

CAHIERS O.R.S.T.O.M.

Journée Georges Aubert

11 septembre 1980

An abstract painting featuring bold, expressive brushstrokes in shades of red, yellow, and green. The composition is layered, with darker, more saturated colors in the upper and lower portions, and lighter, more vibrant colors in the center. The overall effect is one of dynamic energy and organic form.

PEDOLOGIE

SOMMAIRE

1 - LENEUF (N.) - Exposé introductif à la Journée pédologique organisée en hommage à Georges AUBERT	161
2 - BOULAIN (J.) - La contribution de Georges AUBERT et de la section de Pédologie de l'ORSTOM à l'orientation de la pédologie française	163
3 - HÉNIN (S.) - Pédologie et agronomie : du concept de « vocation » au concept d'« aptitude des sols »	173
4 - MILLOT (G.) - Apport de la pédologie à la géologie de la surface	179
5 - TAVERNIER (R.) - Georges AUBERT et son rôle International	183
6 - KOVDA (V. A.) - Georges AUBERT, savant et ami	187
7 - FAUCK (R.) - Sols sub-arides au sud du Sahara	189
8 - CHEVERRY (C.) - Derniers développements de la Recherche sur les sols salés	193
9 - DABIN (B.) - Les matières organiques dans les sols. 197	
10 - PEDRO (G.) et DELMAS (A. B.) - Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique. Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle	217
11 - POUGET (M.) - Les sols à croûte calcaire dans les atepes algériennes : quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle	235
12 - PONTANIER (R.) - Pédologie et écologie en zone aride au nord du Sahara. Aménagement agropastoral d'une région du sud-tunisien sur des bases écologiques	247
13 - RAYCHAUDHURI (S. P.) - The occurrence, distribution, classification and management of laterite and lateritic soils. 249	
14 - RIEU (M.) - La simulation mathématique. Une méthode d'étude des sols salés	253
15 - AUBRY (A. M.), BOULVERT (Y.) et SÉCHET (P.) - Un service offert aux pédologues : représentation automatique élaborée d'un caractère spatial	261
16 - SEGALEN (P.) - Aspects minéralogiques et pédogénétiques de deux sols dérivés de périrhodite dans l'ouest de Cuba. 273	
17 - ROOSE (E.) - Quelques conclusions de recherches françaises sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale	285
18 - BOYER (J.) - Toxicité apparente de certains engrais et intoxication manganique induite	297
19 - LATHAM (M.) - Les oxydisols dans quelques milieux insulaires du Pacifique Sud : caractérisation, conditions de formation, fertilité, classification	305
20 - Intervention finale de Georges AUBERT	317
Table annuelle 1980-1981	321

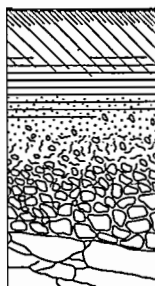
See contents on back cover

série

PÉDOLOGIE

Journée Georges Aubert

11 septembre 1980



C A H I E R S





**ÉDITIONS DE L'OFFICE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER**

Depuis 1962, les éditions de l'ORSTOM publient :

Dans les cahiers de Pédologie, des travaux consacrés à l'étude des sols : morphologie, caractérisation physico-chimique et minéralogique, classification, relation entre sols et géomorphologie, problèmes liés aux sels, à l'eau, à l'érosion, à la fertilité.

En dehors des articles des cahiers, les études sont publiées sous forme de documents divers, dont la liste figure au catalogue des éditions de l'ORSTOM.

COMITÉ DE LECTURE

- | | |
|---|---|
| G. AUBERT, Membre de l'Académie d'Agriculture (France) | R. MAIGNIEN, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM (France) |
| G. BOCQUIER, Professeur à l'Université de Paris VII (France) | A. MELFI, Directeur d'Institut à l'Université de Saint Paul (Brésil) |
| J. BOYER, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) | G. MILLOT, Membre de l'Académie des Sciences (France) |
| J. BOULAIN, Professeur à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (France) | G. MONNIER, Directeur de la Station I.N.R.A. — Montfavet (France) |
| Y. CHATELIN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) | G. MURDOCH, Head, Soil Science and Geomorphology Section (Royaume Uni) |
| A. COMBEAU, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) | A. OSMAN, Directeur de la Division Science du Sol A.C.S.A.D. (Syrie) |
| B. DABIN, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM (France) | G. PEDRO, Directeur de Recherches I.N.R.A. Laboratoire des Sols — Versailles (France) |
| P. DUCHAUFOR, ancien Directeur du centre de Pédologie Biologique — Vandœuvre les Nancy (France). | M. PINTA, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) |
| E. FERNANDEZ-CALDAS, Professeur d'Edaphologie à l'Université de La Laguna à Ténérife, Iles Canaries (Espagne) | I. PLA SENTIS, Président de la Société Vénézuélienne de Science du Sol (Vénézuéla) |
| R. FAUCK, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM (France) | P. QUANTIN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) |
| H. FAURE, Professeur à l'Université de Marseille (France) | P. ROCHE, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM (Côte d'Ivoire) |
| A. FINCK, Professeur à l'Université de Kiel (R.F.A.) | G. SIEFFERMANN, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) |
| J. C. FONTES, Professeur à l'Université de Paris VI (France) | K. F. SEDDOH, Maître de conférences à l'Université de Lomé (Togo) |
| A. HERBILLON, Professeur à l'Université de Louvain la Neuve (Belgique) | G. STOOPS, Professeur à l'Université de Gand (Belgique) |
| S. HENIN, Membre de l'Académie d'Agriculture (France) | G. SYS, Professeur à l'Université de Gand (Belgique) |
| M. JAMAGNE, Chef du Service de la Carte des Sols, I.N.R.A. (France) | Y. TARDY, Professeur à l'Université de Toulouse (France) |
| Ch. JANOT, Professeur à l'Université de Nancy (France) | J. TRICHET, Professeur à l'Université d'Orléans (France) |
| W. N. JOHNSON, Directeur Adjoint du « Soil Conservation Service Washington » (U.S.A.) | A. VAN WAMBEKE, Professeur à l'Université Cornell (U.S.A.) |
| M. LAMOUROUX, Directeur de Recherches à l'ORSTOM (France) | |
| N. LENEUF, Professeur à l'Université de Dijon (France) | |

Pour tout renseignement, abonnement aux revues périodiques, achat d'ouvrages et de cartes, ou demande de catalogue, s'adresser aux :

ÉDITIONS DE L'ORSTOM
Librairie-Diffusion
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY (France)

Les paiements sont à effectuer par virement postal à : *Service Publications ORSTOM, C. C. P. 22.272.21 Y Paris* (à défaut par chèque bancaire barré à ce même libellé).

Volume XVIII

N° 3-4 — 1980-1981

CAHIERS O.R.S.T.O.M.
série PÉDOLOGIE

Journée Georges Aubert

11 septembre 1980

Éditions de l'Office de la Recherche scientifique et Technique Outre-Mer
PARIS - 1981

.....
« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal. »
.....

Exposé introductif

Noël LENEUF

*Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Dijon
Président du Comité Technique de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M.*

Il m'est particulièrement agréable de souhaiter la bienvenue aux participants à cette journée pédologique organisée en hommage à Georges AUBERT :

- à M. M. GLEIZES, Directeur Général Adjoint de l'O.R.S.T.O.M., représentant de notre Directeur Général ;
- aux pédologues O.R.S.T.O.M. et à tous les élèves français et étrangers de G. AUBERT ;
- à nos collègues français et étrangers venus de pays parfois éloignés, en particulier d'Allemagne, d'Angleterre, de Belgique d'Espagne, des Pays-Bas, du Portugal, de Cuba, d'Algérie, du Ghana, d'Iran, de Tunisie, d'Australie, etc.

Je tiens aussi à remercier très vivement :

M. G. CAMUS, Directeur Général de l'O.R.S.T.O.M., qui a proposé d'éditer un cahier spécial de pédologie à cette occasion et offre le vin d'honneur qui clôturera cette journée ;

M. J. DELAGE, Directeur de l'Institut National Agronomique, qui nous a offert gracieusement la libre disposition de l'Amphithéâtre Tisserand.

M. G. AUBERT enfin, qui a bien voulu accepter que nous organisions cette journée en son honneur.

. * .

Georges AUBERT, ancien Président du Comité Technique de Pédologie et Chef de la Section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. de 1944 à 1975 a pris sa retraite en janvier 1980.

Il est le fondateur de cette section, appelée antérieurement Centre de Pédologie dans l'ancien Office de la Recherche Scientifique Coloniale qui a vu le jour en 1943. Dès le tout début, il a été le guide et l'organisateur de cette section du point de vue formation des pédologues en métropole et pour diriger les premières activités scientifiques sur le terrain en compagnie d'un certain nombre de collaborateurs pédologues comme S. HENIN, R. CHAMINADE, H. ERHART dans les différentes sphères d'activité O.R.S.T.O.M. en Afrique du Nord, en Afrique Noire, à Madagascar, en Guyane, en Océanie.

Trente-cinq promotions, représentant 341 élèves pédologues de niveau post-universitaire français et étrangers, ont été en stage sous sa direction ou avec ses collaborateurs de 1944 à 1980. Nombre d'entre eux ont atteint l'audience internationale et occupent aujourd'hui des postes scientifiques importants.

Outre son influence sur la formation des pédologues O.R.S.T.O.M., G. AUBERT a été chargé de cours de Science du Sol (Pédologie) à l'Institut National Agronomique, à l'École Nationale supérieure d'Agronomie de Grignon, à l'École d'Agriculture d'Angers, à l'Institut de Géologie de Nancy, à l'École du Génie Rural et des Forêts, à l'Université de Paris (Diplôme d'Études Approfondies en Géodynamisme Externe), etc., sans oublier de nombreux cours et séminaires internationaux organisés en particulier par l'U.N.E.S.C.O. sur les sols salés, les sols des régions arides, les forêts tropicales, etc.

Cette liste d'établissements d'enseignement agronomique et universitaire témoigne de toute l'influence que G. AUBERT a pu exercer en France et à l'étranger sur la formation pédologique extérieure à l'O.R.S.T.O.M. Il a été, et est encore, un personnage scientifique hors du commun qui a créé autour de sa personnalité, grâce à son enthousiasme, une école pédologique, « l'école O.R.S.T.O.M. » qui a marqué profondément depuis 35 ans l'étude des sols des régions intertropicales et méditerranéennes.

Il a été le « patron », le « maître » qui a maintenu l'orthodoxie de son dogme pédogénétique, pourfendant toujours avec passion les hérétiques ou les déviationnistes dans les domaines des théories génétiques, du langage ou de la classification.

Georges AUBERT est un homme de terrain qui recèle dans ses carnets de notes, un nombre impressionnant de profils, décrits avec minutie, couvrant la plupart des régions du globe. Je pense qu'aucun pédologue au monde n'en possède autant. Il a vu, observé, décrit, noté « tout », et s'en souvient. Ses idées, ses concepts se sont forgés pendant cette grande et laborieuse expérience de terrain.

Aujourd'hui la Section de Pédologie a tenu à honorer son « patron » en organisant en son honneur cette journée scientifique. Les journées pédologiques de septembre sont devenues une tradition; c'est une période favorable où le maximum de chercheurs de notre organisme sont en France avant de rejoindre leur affectation en régions tropicales. De nombreux thèmes ont été mis à l'ordre du jour et des invitations ont toujours été formulées à nos collègues métropolitains et étrangers. Cette journée sera exceptionnelle, mais elle reste dans les mêmes intentions scientifiques. Son programme comprendra deux volets dûment motivés :

1. La matinée sera consacrée à une analyse de la pédologie O.R.S.T.O.M. et de son influence extérieure à travers ses concepts, la géochimie, les relations internationales et l'agronomie, toutes données qui ont fortement marqué les activités et les voies de Georges AUBERT.

J'ai pensé, avec mes collègues du Comité Technique que la meilleure solution pour cette matinée était de se faire juger (ou plutôt apprécier) par d'éminentes personnalités extérieures qui ont été très souvent et profondément associées à nos activités :

— le Professeur J. BOULAIN, de l'I.N.A. Paris-Grignon, compagnon fidèle de Georges AUBERT en Afrique du Nord traitera des concepts de l'École O.R.S.T.O.M.;

— le Doyen G. MILLOT de l'Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Membre de l'Académie des Sciences, évoquera l'influence O.R.S.T.O.M. dans les études de Géochimie de Surface;

— le Professeur R. TAVERNIER de l'Université de Gand, traitera de l'influence internationale de Georges AUBERT dans la pédologie mondiale;

— le Professeur S. HENIN, Directeur de Recherche honoraire de l'I.N.R.A, nous parlera des relations entre la Pédologie et l'Agronomie.

2. Dans l'après-midi, les débats seront dirigés par G. AUBERT lui-même sur un thème choisi intentionnellement pour rendre hommage à son influence dans la pédologie des régions méditerranéennes et des régions subarides subtropicales. Notre objectif est de faire le point sur les derniers développements scientifiques concernant les sols de ces régions, dans les domaines de l'*aridité* et de la *salinité*, zones particulièrement importantes du point de vue de l'économie agricole et dont la vulnérabilité n'a jamais échappé aux soins des pédologues.

Les premiers travaux de G. AUBERT se sont déroulés dans ces zones arides. Ce sont ses « premières amours », envers lesquelles il a manifesté une fidélité à toute épreuve. Ses dernières missions de 1980 se sont d'ailleurs déroulées en Algérie, au Maroc et... au Mexique.

Ce sont des scientifiques de l'O.R.S.T.O.M. (ou des anciens de l'Office) qui ont été chargés des exposés :

— *Sols salés*

M. RIEU Chargé de Recherches O.R.S.T.O.M. et C. CHEVERRY Professeur à E.N.S.A. Rennes.

— *Zones arides*

M. POUGET Directeur de Recherche ; R. PONTANIER Maître de Recherche O.R.S.T.O.M.

— *Zones subtropicales au sud du Sahara*

Un vieux « briscard », R. FAUCK, Inspecteur Général de Recherches O.R.S.T.O.M.

Georges AUBERT présidera et dirigera les discussions et adressera à l'auditoire un message à l'issue des débats.

Bonne journée à Tous.

La contribution de Georges AUBERT et de la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. à l'orientation de la Pédologie Française

J. BOULAINÉ

*Professeur de Pédologie à l'Institut National Agronomique
Directeur du laboratoire de Pédologie de l'I.N.R.A. de Grignon*

- *L'auteur remercie particulièrement tous les anciens élèves de G. AUBERT dont il a lu les textes ou qu'il a interrogés ces derniers mois ; ils lui ont donné des idées fertiles et des formules heureuses.*
- *L'auteur s'est cependant interdit de citer tous les auteurs ayant commencé leur carrière après la guerre et prend l'entière responsabilité de ce texte.*

Le 13 novembre 1968, le Président de l'Académie d'Agriculture de France s'émerveillait « du développement de la Pédologie, totalement inconnue » lorsqu'il était étudiant « *et qui s'est développée depuis 40 ans avec des prolongements extrêmement nombreux* ».

Et Georges AUBERT répondait « *il y a 30 ans, il n'y avait que 3 ou 4 pédologues en France... actuellement plusieurs centaines... il est normal que du bon travail ait été fait* ».

Il ne disait pas, mais nous le savons tous, que plus des 3/4 de ces pédologues avaient été ses élèves à l'O.R.S.T.O.M., que beaucoup devaient leur poste à son activité et que tous avaient subi son influence.

Depuis 45 ans, l'école française de Pédologie est enseignée, animée, conseillée, par Georges AUBERT et par ses élèves de l'O.R.S.T.O.M. Elle a eu d'autres sources importantes et, en premier lieu naturellement, l'œuvre de Ph. DUCHAUFOR dont nous connaissons tous, à la fois les approches proprement personnelles et celles qui sont indissociables des travaux de Georges AUBERT comme par exemple, la classification des sols. Mais c'est l'apport de ce dernier que je dois étudier ici, et je pense avoir l'adhésion de tous en disant que, plus diffus sur le plan de l'expression écrite, il n'en reste pas moins à la base de ce qui fait l'originalité de nos concepts, et de notre attitude vis-à-vis du problème qui était déjà celui de DOKOUCHAEV en 1877 : *rendre compte, avec les moyens de notre époque, de la nature et du comportement des sols.*

1. LES DIX ANNÉES DE PRÉPARATION (1934-1944)

Quand G. AUBERT entre au Centre de Recherches Agronomiques de Versailles le 4 novembre 1934, sur les conseils de M. LEMOIGNE et sous les ordres de A. DEMOLON qui deviendra dès lors son maître, quelles sont ses armes pour aborder cette question ?

D'abord : des chances. — Une tradition familiale de haute culture littéraire et scientifique, une formation solide d'agronome, des collègues qui deviendront très vite des amis : S. HENIN, G. DROUINEAU, R. CHAMINADE, G. BARBIER; quelques aînés : A. OUDIN, A. DEMOLON, et l'environnement scientifique solide de la recherche agronomique et de la vieille Sorbonne où il achèvera sa licence de naturaliste.

Puis des circonstances heureuses : c'est l'époque où la science française se réveille après le traumatisme de 14-18. L'Association Française pour l'Étude des Sols vient de naître le 25 octobre 1934 et 297 inscriptions précèdent celle de G. AUBERT. On parle beaucoup de Pédologie dans les premiers bulletins, et A. OUDIN orchestre les premiers essais de classification et de cartographie avec l'autorité qui lui donne sa grande culture et son cours de Pédologie à l'école Forestière de Nancy.

A part cela, le vide ou presque. Une salle nue avec un tas d'échantillons dans des bocaux ou des sacs dont les étiquettes, rédigées par V. AGAFONOFF, sont en russe. Leur traduction sera le seul contact de G. AUBERT avec les héritiers de DOKOUCHEV.

La bibliographie est squelettique : essentiellement les ouvrages de RUSSEL et bientôt, de ROBINSON, qui lui permettent d'apprendre la Pédologie de l'époque. Les livres de H. ERHART et de V. AGAFONOFF n'effaceront pas, semble-t-il, l'impact de ces deux auteurs anglais.

Quelques laboratoires, certes, où il passe ses premiers mois de travail à comparer des méthodes de dosage du phosphore dans les sols et à améliorer les granulométries, et à part une fosse étudiée avec G. DROUINEAU dans les parcelles de Versailles, ce n'est qu'au printemps de 1935 qu'il verra ses premiers profils avec A. OUDIN. C'est le même G. DROUINEAU d'ailleurs qui sera en 1968 l'artisan de la création du Service de la Carte Pédologique de France dont il confiera à G. AUBERT la présidence du Comité Scientifique et du Comité Directeur.

Ces quelques détails anecdotiques nous font sentir à quel point la Pédologie Française était inexistante à l'époque. Le monde savant français avait certes eu connaissance des idées de DOKOUCHEV et les avait accueillies souvent avec enthousiasme car elles étaient dans la ligne du darwinisme. Mais, en même temps, les agronomes, et notamment CARNOT et RISSLER, s'étaient accrochés à la conception de l'école allemande purement agro-géologique. Le sol était pour eux le *Résidu* de l'altération des roches et la caractérisation de celles-ci était la condition nécessaire et suffisante de la connaissance du sol.

Certes, il y avait quelques précurseurs, quelques hommes qui ont transmis soit l'héritage russe (AGAFONOFF, BRYSSINE, MARGULIS) soit ce que les auteurs d'Europe centrale en avaient fait (ERHART); il y avait aussi des agronomes : BRUNO, LENGLEN, RADET, BORDAS, et bien d'autres (297!), qui essayaient localement ou régionalement, en France comme en Afrique du Nord, de commencer un inventaire typologique et cartographique des sols : leurs travaux sectoriels en Chimie du sol, en Physique du sol, voire même en Biologie du sol, étaient importants : ils constituaient une base solide de quantification des données et des protocoles d'applications opératoires. Il y avait quelques idées ramenées des congrès internationaux : n'oublions pas, en particulier, que L. CAILLEUX a été, avec VINOGRADSKY, l'un des 7 membres fondateurs de l'Association Internationale de la Science du Sol en 1924, héritière des réunions internationales de Pédologie.

Il y avait, surtout, des chefs de file dont nous sentons encore la forte influence : A. DEMOLON et A. OUDIN. Ce sont eux qui ont voulu la Pédologie française.

Mais la Pédologie n'était enseignée nulle part en France sauf à l'école Forestière de Nancy; mais il n'existait aucun traité, aucune revue, aucune bibliothèque, aucune carte, aucune expérience, aucun laboratoire, aucune tradition. Un petit groupe d'hommes va créer tout cela en quelques années, au premier rang desquels Georges AUBERT militera sans cesse aussi bien dans les milieux scientifiques qu'auprès des administrations et des services techniques où son souci des applications emportera peu à peu l'adhésion de bien des responsables.

Tout d'abord, en quelques années, de 1935 à 1944, il lève la carte du quart nord-ouest de la France (publiée à 1/1 000 000 en 1968) et il est chargé de plusieurs missions en Algérie occidentale, à Relizane notamment. Il aborde alors les problèmes de salinité et d'érosion des sols pour lesquels il gardera toujours un vif intérêt. Son expérience personnelle s'enrichira encore en 1948 par un séjour de 3 mois et demi aux U.S.A. et au Canada. Auprès de KELLOG, mais aussi de nombreux pédologues américains, il pourra parfaire ses connaissances théoriques, augmenter son expérience du terrain dans de nombreux milieux très différents les uns des autres, et préciser au cours de discussions approfondies les idées et les concepts originaux qui vont désormais sous-tendre toute son action scientifique.

En septembre 1937, le VII^e Congrès International d'Agriculture Tropicale lui avait donné l'occasion d'esquisser par écrit ce qui sera plus tard la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. Son intuition bien connue maintenant de nous tous, lui permet là de synthétiser les points de vue opposés de GLANGEAUD et d'AGAFONOFF et de prophétiser littéralement ce qu'il ne réalisera que beaucoup plus tard.

En 1944, son action s'étend comme Chef de la Section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M., à tout l'Outre-Mer Français, puis au Monde entier, en même temps que débute pour la première fois en France un enseignement dont sont issus la plupart des pédologues français actuels et de nombreux pédologues étrangers.

2. LA PREMIÈRE CONTRIBUTION DE LA SECTION DE PÉDOLOGIE O.R.S.T.O.M. : L'APPROCHE NATURALISTE

Dans leur grande majorité, les pédologues français ont été formés soit par l'enseignement agronomique et forestier, soit par les naturalistes universitaires : botanistes, écologistes et surtout, géologues et minéralogistes. C'est une simple constatation de dire que ceux de l'O.R.S.T.O.M., comme leur chef de file, sont principalement des agronomes ou des géologues.

A ce titre, ils ont toujours su que le sol avait un âge, que son développement s'était poursuivi au cours des dernières périodes géologiques et qu'une histoire parfois complexe avait présidé à leur genèse.

Mais, en outre, les liaisons avec l'environnement sont perçues avec acuité. Leur étude et l'exploitation de cette idée érigée en principe a été illustrée par les travaux des élèves de G. AUBERT et fut l'un des thèmes principaux de son discours d'ouverture de la conférence sur les sols méditerranéens, à Madrid, en 1966. En 1960, elle est manifestée par l'affirmation que « *le sol est une unité tridimensionnelle et non bidimensionnelle* » dans les comptes rendus de l'Académie et tous les anciens élèves se rappellent la célèbre formule « *le profil dans le paysage* ».

Il n'est plus question d'étudier le sol en un point donné en ne tenant compte que des migrations verticales, puis de rechercher la répartition du type ainsi défini, mais, au contraire, *d'élucider, en même temps, les caractères propres du sol et ceux de son environnement*, et d'envisager la contribution de celui-ci à la formation des constituants, de la morphologie et des propriétés de celui-là.

Le sol apparaît alors comme le *Résultat* d'actions complexes, tendances évolutives, zonales, mélangées à des héritages géologiques et à des remaniements locaux avec des transferts de surface ou internes, solides ou liquides, pouvant s'exercer dans toutes les directions, la verticale n'étant que la plus privilégiée.

En termes modernes, nous disons que pour rendre compte de la couverture pédologique, nous étudions dialectiquement quelques pédons, leurs facteurs de différenciation et les limites de l'unité cartographique à laquelle ils appartiennent, mais c'est en fait la même attitude d'esprit que celle qui faisait G. AUBERT se battre jusqu'à la victoire en 1950 au Congrès d'Amsterdam pour que la Commission V de l'A.I.S.S. s'intitule : *Morphologie, Genèse, Classification*, au lieu de morphologie, classification, genèse.

L'ordre des facteurs est parfaitement significatif.

D'ailleurs, grâce à son expérience armoricaine, méditerranéenne et tropicale, Georges AUBERT a pris, très tôt, une autre option fondamentale. *Il refuse d'adhérer à la vision zonale de la répartition des sols*. Dans le cours ronéotypé clandestin de 1965, on trouve par exemple cette phrase « *la notion de sols zonaux, azonaux, intrazonaux est pratiquement à rejeter* ». C'est surtout en s'abstenant de s'y référer qu'il s'oppose à la soi-disant loi de zonalité. C'est au fil des discussions sur le terrain, des corrections de rapports ou de thèses, dans les interventions orales que passe le message. Il met longtemps à ressurgir, mais ne nous y trompons pas : si les pédologues français ont si facilement adopté les notions d'héritage, de transformation et de néosynthèse, depuis quinze ans après G. MILLOT et Ph. DUCHAUFOR, c'est parce qu'ils avaient l'esprit préparé à percevoir dans un même sol des caractères dont certains sont zonaux et d'autres azonaux. L'équipe de l'O.R.S.T.O.M., en découvrant par exemple des podzols à Madagascar ou en Guyane, a donné de nombreux exemples de la justesse de cette perspective.

3. L'APPROCHE GLOBALE ET DYNAMIQUE DE L'OBJET-SOL AUTRE CARACTÈRE ORIGINAL DES PÉDOLOGUES DE L'O.R.S.T.O.M.

En mars 1944, le Professeur COMBES, Directeur de ce qui deviendra plus tard l'O.R.S.T.O.M., propose à G. AUBERT de prendre la direction d'une section de Pédologie. Celui-ci formule alors une exigence unique mais hautement significative.

Il veut que soient associés, dans l'organisation de la section, dans l'enseignement des pédologues comme dans leurs travaux d'outre-mer, tous les aspects de la Science du sol.

La section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. étudiera conjointement les aspects géologiques, minéralogiques, chimiques, physiques, biologiques des sols et s'attachera aussi bien à en préciser les types, et pour cela, tentera

d'élucider la pédogenèse que de caractériser le fonctionnement afin de valoriser cette connaissance dans des applications.

Ce concept globaliste de l'étude des sols est parfaitement révolutionnaire en France et à cette époque. Il s'oppose à un découpage strictement analytique de la Recherche (1). Et sur le plan international, c'est un retour aux idées de l'école russe de la fin du XIX^e siècle, mais qui avaient été fort édulcorées, sous la pression des circonstances d'ailleurs, par beaucoup des successeurs des premiers pédologues.

Dès lors, les chercheurs de l'O.R.S.T.O.M., et aussi ceux des élèves de la Section de Pédologie de cet organisme qui essaieront dans la communauté scientifique et technique française, seront tous marqués par cette attitude. Il n'y a plus de spécialistes d'une discipline qui appliquent leurs techniques à des échantillons de sols; il y a désormais des *pédologues* qui font appel, pour étudier leur objet, à des techniques développées par telle ou telle discipline. Quand on connaît l'inertie des milieux administratifs et scientifiques, on ne sait pas ce qu'il faut admirer le plus : l'énergie de l'homme qui a obtenu une telle révolution ou l'intelligence de ceux qui ont su le comprendre. Le dictionnaire Larousse en introduisant le mot *pédologue* consacrerait, vers les années 60, pour le grand public, le succès de cette formule. Le petit Robert en fait de même en 1972.

D'autre part, l'équipe de l'O.R.S.T.O.M., sous l'influence de G. AUBERT, a toujours étudié le sol en vue de son utilisation. Cela avait beaucoup frappé le Président de l'Académie d'Agriculture, P. VAYSSIÈRE qui, dans son allocution de réception le 1^{er} juin 1955, note que l'O.R.S.T.O.M. fait, en Afrique, deux cartes : « *une pédologique, l'autre d'utilisation des terres* ».

Il est à ce propos extrêmement instructif de lire les communications de S. HÉNIN, puis de G. AUBERT, ainsi que les interventions de J. LEFÈVRE, à l'Académie d'Agriculture en 1957. Le premier constate que la chimie du sol est une approche incomplète, que « *les échantillons extraits de leur cadre naturel ont perdu une partie de leurs caractères* », qu'il y a un fossé entre l'agriculteur et le scientifique et que « *la Pédologie vient combler ce fossé* ». Quant à J. LEFÈVRE, il note qu'il est bon de comprendre la pédogenèse des sols, « *mais toute la physico-chimie du sol, sa vie, sont autant de notions complémentaires et inséparables* ».

G. AUBERT approuve totalement cette façon de voir. Il nous a enseigné qu'un « *sol peut mourir, le sol peut renaître* ». Cette vie cyclique, saisonnière du sol que nous décrivons aujourd'hui en termes de régimes, se traduit par une succession d'états variables en fonction du temps et l'utilisation du sol doit en tenir compte : le sol n'est donc pas une entité inerte, mais au contraire, une entité vivante, inséparable de son site. C'est une idée classique certes en Pédologie, les grands précurseurs russes de la fin du XIX^e siècle l'avaient exposée; V. AGAFONOFF et d'autres l'avaient à nouveau affirmée.

Nous disons aujourd'hui que le sol est une *Résultante*, une entité dynamique, qui comporte trois ensembles de caractère : des constituants, une organisation et des régimes, qui s'expriment à un moment donné par une ambiance physico-chimique.

C'est peu à peu que ce langage s'est imposé. Il est sous-tendu par cette idée majeure que la connaissance des sols n'a de valeur que si elle est globale, et que si elle nous permet de prévoir ses réactions, ses aptitudes, son fonctionnement, son comportement en réaction aux travaux des hommes, bref, son utilisation dynamique.

C'est d'ailleurs l'idée force de l'œuvre d'Albert DEMOLON. Elle s'exprime dans le titre même de l'ouvrage fondamental de celui-ci, *La dynamique des sols* (2).

Il suffit d'ouvrir l'ouvrage de DEMOLON pour constater que cette dynamique du sol comporte toute la Science du Sol, y compris la pédologie traditionnelle réduite à l'étude de la pédogenèse. Mais la Pédologie de l'école O.R.S.T.O.M. est l'héritière de la dynamique des sols de DEMOLON. C'est une Pédologie au sens le plus large du terme, l'équivalent comme l'écrivait déjà AGAFONOFF de Potchvoviedenie, de Soil Science, de Bodenkunde, d'Edaphologia.

C'est le sens primitif du mot Pédologie qui a été remplacé par Science du Sol à la 4^e Conférence Internationale de Rome (1924), quand fut fondée l'Association Internationale de la Science du Sol.

(1) BAEYENS avait proposé en 1938 une « *Pédologie Totalitaire* ». Le mot était malheureux, mais l'idée, analysée par DEMOLON dans le bulletin de l'A.F.E.S., n'est probablement pas étrangère à l'orientation de la section O.R.S.T.O.M.

(2) G. AUBERT l'a analysée en détail dans sa note à l'Académie de 1960 (p. 394). Il y montre comment DEMOLON avait une conception du sol, « *élément naturel, objet de recherche en lui-même* », et comment pour lui, l'étude des « *diverses caractéristiques de chacun des horizons, des liaisons entre ces horizons eux-mêmes et des relations entre ces premiers éléments et l'ensemble de ceux... qui constituent le milieu, ... où est situé le sol, est l'objet même de cette Science du Sol* ».

Ce sol, « *déjà qu'il a commencé à se constituer, il évolue et maintenant encore, sans cesse... il continue d'évoluer. Cette transformation se produit... suivant des réactions dont l'ensemble constitue sa dynamique* ».

4. L'APPROCHE MORPHOGÉNÉTIQUE POUR LA CARACTÉRISATION ET LA CLASSIFICATION DES SOLS

La classification française (C.P.C.S., 1967), dérive directement des travaux de G. AUBERT. C'est à travers elle, fil directeur de son enseignement que ses idées se sont manifestées concrètement. Elle apparaît dès 1938 dans la deuxième édition du livre de DEMOLON, s'enrichit d'apports substantiels de 1944 à 1954, et, en collaboration avec Ph. DUCHAUFOR, prend sa forme quasi définitive en 1956. Elle est morphogénétique : *elle sépare et hiérarchise les unités taxonomiques en appliquant l'idée que la diagnose d'un sol peut et doit commencer par la perception de sa morphologie : roches sous-jacentes, horizons, structure, couches organiques de surface, et que l'analyse de ces caractères morphologiques ainsi que celle des constituants et des propriétés des sols échantillonnés dans les unités ainsi reconnues avec une perspective génétique est la voie la plus sûre, la plus directe, la plus économique pour rendre compte de l'objet-sol jusque, et y compris, les applications pratiques.*

Toute l'École Pédologique française est pénétrée, consciemment ou non, par cette façon d'aborder l'étude des sols. Elle a conduit l'équipe de l'O.R.S.T.O.M. à consacrer beaucoup de travaux à l'étude des mécanismes pédologiques. G. MILLOT doit les analyser tout à l'heure, et il le fera certainement d'une façon lumineuse.

Dans ce domaine, c'est la reconnaissance, la définition et l'analyse des grands processus de pédogenèse qui constituent l'apport majeur de G. AUBERT et c'est à l'œuvre personnelle de celui-ci que je voudrais m'attarder. Il a contribué à la mise en évidence et à la définition du lessivage qu'il a nettement distingué de la podzolisation, il a largement développé le concept de sol ferrallitique et créé celui de sol ferrugineux tropical ; les concepts de sol isohumique, la distinction des vertisols topomorphes et lithomorphes sont de lui ainsi que la mise en évidence de l'origine pédologique des croûtes et carapaces calcaires, des cuirasses ferrugineuses et des encroûtements gypseux. Il a aussi largement contribué à la reconnaissance des processus de salinisation des sols.

A travers ROBINSON, c'est STUART MILL qui, d'ailleurs, inspire G. AUBERT et il a certainement lu le chapitre sur la classification du premier de ces auteurs qui recommande de s'appuyer sur les causes plutôt que sur les effets tout en reconnaissant que les caractères qui permettent la diagnose relèvent plutôt des seconds.

G. AUBERT nous a appris autant à essayer de comprendre pour voir qu'à voir pour essayer de comprendre ; c'est un processus lent et long ; il débouche sur une prise de données appuyée sur un premier raisonnement, mais qu'il faut confirmer par des analyses, de nouvelles prises de données et ainsi de suite : c'est la démarche dialectique d'ailleurs et nous savons qu'elle a envahi toute la science.

Quelques exemples nous permettent de mieux la percevoir.

L'émergence de la notion de sol lessivé

Il faut se rappeler qu'à cette époque, pour AGAFONOFF (1936), les sols de limons du bassin Parisien n'ont qu'une quarantaine de centimètres d'épaisseur, qu'ils sont azonaux et que l'horizon B n'est que ce que nous appelons aujourd'hui un A₂ ou un A₃. H. ERHART, en 1935, emploie le mot lessivation et l'adjectif lessivé, mais dans le sens du mot actuel lixiviation. Et, dans son livre de 1952, sur les sols d'Europe, W. KUBIENA passe en revue (p. 366), les différents aspects de l'illuviation (WYSSOTZKI, 1899) et ne dit rien de l'argile. Il n'en dit rien non plus à propos de la définition de l'horizon B (p. 27).

En 1958 encore, le Dictionnaire des Sols mélangera encore des notions anciennes et des notions nouvelles et n'arrivera pas à une définition rigoureuse.

Et cependant, l'entraînement des argiles et leur accumulation en profondeur ont été perçus très tôt, mais comme un simple aspect de la podzolisation. Il y a eu des précurseurs, notamment AMALITSKII (1885), TREITZ (1913), POPOVAT (1933) et ROBINSON (1936), qui séparent les deux processus « *mechanical* » et « *chemical leaching* », mais c'est CERNESCU (1934-1938) qui distingue la podzolisation vraie d'une « podzolisation secondaire », peut-être sous l'influence de l'école russe où WILLIAMS professait alors, que l'évolution du sol commence par la podzolisation, de sorte qu'un autre phénomène, l'entraînement des argiles, ne pouvait être que postérieur si toutefois il était différent.

Vers les années 35, les auteurs français ne faisaient pas la distinction et le terme podzolisation couvrait l'évolution de tous les sols tempérés plus ou moins acides.

Cependant, dès 1935, G. DROUINEAU étudie deux sols situés à 30 mètres de distance dans le parc de Versailles, sur le même limon loessique et dont on est sûr que l'un est sous prairie l'autre sous forêt depuis Louis XIV. Et, « *contrairement à l'opinion souvent admise, la couverture forestière n'a nullement favorisé l'entraînement de*

l'argile en profondeur et cela malgré un enrichissement considérable en humus et une acidification marquée des couches superficielles ».

En 1937, E. RADET et C. MANTELET, étudiant les sols sur roches calcaires, constatent un *entraînement de l'argile dans les couches profondes et un lessivage très net avec migration de l'argile en profondeur*, et ils distinguent trois phases dans l'évolution des phénomènes de *lixiviation* : la migration du calcaire, puis de l'argile, puis des oxydes de fer.

Des questions se posaient donc : antinomie du lessivage des argiles et de l'acidification, présence de lessivage d'argile dans des milieux neutres ?

La question restera longtemps posée en termes ambigus.

En effet, le mot lessivage était pris dans le sens de *lixiviation* ; pour les pays tempérés et boréaux on ne concevait à l'époque qu'un seul processus : la podzolisation (assimilée au lessivage), entraînement de substances essentiellement de colloïdes : argiles, humus, et cations associés. « *La migration de l'argile ne s'observe que dans les climats humides et caractérise les sols podzoliques* » (A. DEMOLON, 1944, p. 31); (p. 43 « les sols podzoliques sont des sols lessivés ».

Faut-il suivre l'Encyclopédia Universalis, pour qui le « *terme sol lessivé semble avoir été créé par G. AUBERT en 1936, et employé pour la première fois dans une publication scientifique par A. OUDIN (1937). Il s'agissait de désigner les sols présentant un horizon B textural d'accumulation d'argile que M. BALDWIN (1927) qualifiait de gray-brown podzolic soils et V. AGAFONOFF (1936) de sols podzoliques bruns* ».

Dans la classification d'A. OUDIN (1937), les sols lessivés et bruns lessivés actuels sont groupés avec les sols bruns dans une série de transition (N_1 , N_2 , U), mais pour l'ouvrage d'A. DEMOLON (1938, 1944), G. AUBERT, qui a rédigé le chapitre III (p. 56) distingue la série podzolique et la série des sols lessivés. Mais ceux-ci sont conçus comme « *encore nettement différenciés, mais où l'entraînement des éléments en profondeur n'atteint pas la même intensité que dans les sols podzoliques* ».

Quand on lit en détail les publications de cette époque, on sent l'hésitation, le souci de ne pas heurter les idées régnantes et, en même temps, les tentatives pour faire évoluer les concepts pour clarifier le langage et pour distinguer deux processus et deux grands ensembles de sols.

En 1946, dans l'étude des sols de la forêt d'Harcourt, G. AUBERT et Ph. DUCHAUFOR franchissent le pas : ils décrivent :

(a) des sols podzoliques, et

(b) des sols lessivés, même s'ils définissent pour ceux-ci un coefficient de podzolisation qui est le rapport de l'argile B à l'argile A !

Il faut attendre 1948 pour que, dans sa thèse, Ph. DUCHAUFOR distingue deux phases fondamentales « *la première entraînement purement mécanique de colloïdes électronégatifs* »... « *la seconde phase est une podzolisation chimique* » — et ce n'est qu'en 1951 que celui-ci explicitera définitivement le concept de lessivage. Mais il semble bien que ce soit au cours des discussions approfondies avec G. AUBERT que leurs idées se sont décantées. Ce dernier était à l'époque, ne l'oublions pas, un spécialiste de la granulométrie.

Désormais, G. AUBERT, par la parole, dans le monde entier, et Ph. DUCHAUFOR par le texte écrit, vont populariser le terme de sol lessivé et affirmer la catégorie des sols lessivés. En 1957, G. SMITH et R. TAVERNIER, dans un article fondamental d'« *Advances in Agronomy* » font le point de la question. La même année, FRIDLAND reprend la même idée en russe sous le terme *Illmerisation*, et STEFANOVITS publiera en 1971 une mise au point quasi exhaustive des travaux des pédologues de l'Europe orientale sur ce sujet. En 1960, les Américains créeront les concepts d'horizon argillique et d'horizon spodique. Ces horizons on les observera, on les mesurera avec des critères précis et objectifs que la connaissance des processus aura permis de mettre au point.

Actuellement, le mot lessivé est compris par les pédologues du monde entier et les concepts de LUVISOL et d'ALFISOL ont envahi la légende F.A.O. et la Soil Taxonomy. BUOL *et al.*, 1973, par exemple, parlent de « *Illuviation of clay, a process called lessivage* ».

Ces recherches sur le lessivage ont duré des années. Les faits de départ étaient analysés avec difficulté, mais ils ont permis de percevoir des mécanismes et des modes d'évolution (lessivage et podzolisation) qui, à leur tour, ont permis de mieux voir les faits (horizons argilliques et spodiques) qui permettent d'affiner l'étude des mécanismes. C'est la dialectique scientifique « *épuration d'une connaissance sous la pression d'une expérience avec laquelle elle se confronte* » (P. FOULQUIÉ, 1976).

Georges AUBERT a été la navette patiente qui a tissé une bonne partie des fils de cette toile d'araignée. Il a mis au point les méthodes d'analyse granulométrique du laboratoire de Versailles, il a fait du profil et de la

carte, il a réfléchi sur les processus par ses lectures et pour son enseignement, et petit à petit, par touches légères, de corrections en coup de pouces, de travaux personnels en travaux d'amis ou d'élèves, il est arrivé, sans heurter personne, à rendre évident ce processus de lessivage qui nous semble maintenant si évident.

Exemple des Vertisols

Il y a 20 ans, le concept a été adopté, d'emblée et sans réticences. Depuis 20 ans, les équipes de classificateurs hésitent, proposent, reviennent en arrière. On a essayé d'utiliser la structure de l'horizon de surface, la couleur, l'ouverture et la fermeture des fentes. Que sais-je encore ?

La solution proposée par l'équipe O.R.S.T.O.M. est de distinguer les sols dont la genèse est gouvernée par la nature de la roche-mère de ceux dont la genèse est liée à la position topographique. Ce sont les deux grands cas de gisement des vertisols. Mais, et c'est là l'important, ces deux situations ont un maximum de chances de se répercuter sur les caractères des sols. Dans le premier cas (Vertisols Lithomorphes), les solutions du sol ont un drainage externe. Normalement, le sol doit se lixivier et devenir un planosol ou un sol ferrugineux tropical, voire un sol ferrallitique. Mais la nature de l'argile, qui reste gouvernée par celle du matériau originel fait qu'il y a brassage du sol et ces caractères restent longtemps discrets et limités à l'horizon superficiel.

Dans le second cas (Vertisols Topomorphes, ou Fluviqes), il y a arrivée de solutions confinées, cicatrisation ou néosynthèse de smectites gonflantes, l'auto-brassage gommant quelque peu ces caractères d'agradation et de confinement, surtout si l'héritage alluvial est lixivié, mais si nous les cherchons bien, pourquoi ne les trouverions-nous pas ?

En d'autres termes, ce n'est pas la diagnose physico-chimique qui détermine notre vision du sol, mais notre observation de son organisation, de ses régimes, et de ses relations avec l'environnement qui oriente nos mesures de laboratoire y compris dans la mise au point des protocoles et des méthodes et, si plus tard la diagnose physicochimique devient la routine, elle repose pour sa mise au point sur une approche dialectique dans laquelle l'observation des pédogenèses possibles joue un rôle d'orientation du diagnostic et du choix des données qualitatives et quantitatives qui infirment ou confirment le raisonnement.

Autre exemple : les sols à sesquioxydes de fer

Dans le domaine des sols méditerranéens et tropicaux automorphes, l'apport de l'école française a été tout autant original.

Tous ces sols ont d'abord été rassemblés dans une classe unique des sols à sesquioxydes de fer, puis dissociés en sols ferrallitiques (1954), ferrugineux tropicaux (1947), et fersiallitiques (1967).

Les deux premiers ensembles, maintenant des classes, ont été définis notamment en 1954 à LÉOPOLDVILLE. Mais c'est la communication du Congrès de Bucarest (1960) de G. AUBERT qui en a le mieux précisé les contours.

Depuis le début de la Pédologie, on savait que les sols des pays chauds et humides ne relevaient pas de la podzolisation : A. DEMOLON (1938) les appelait Sols latéritiques, à la suite d'ailleurs d'une évolution des connaissances plus que centenaire qui a été parfaitement étudiée par une publication de l'O.R.S.T.O.M. de 1970.

Le terme de sols ferrallitiques employé sous sa forme adjectivale par ROBINSON en 1949, repris par BOTHELHO DA COSTA, a été popularisé par le texte de la conférence de G. AUBERT sur les « sols latéritiques » au Congrès de Léopoldville en 1954. On le retrouve naturellement dans la classification française de 1957, et dans la légende de la carte du monde de la F.A.O. (1975) sous la forme *Ferralsols*.

Les Sols Ferrugineux tropicaux, peut-être entrevus par ROBINSON (1949) sous le terme de « *yellow earths* » équivalent des yellow podzolic soils et transition entre sols rouges tropicaux et les sols bruns forestiers des climats tempérés, ont été définis au Congrès de Léopoldville (1954) et de Bucarest (1964) par G. AUBERT et par de nombreuses publications O.R.S.T.O.M. Quant aux sols fersiallitiques, si la définition reste encore à préciser, la notion restée longtemps utilisée par les seuls pédologues français vient de faire son entrée dans les documents de travail de la F.A.O. (1980).

5. CONCLUSION. LE ROLE DU CHEF DE LA SECTION DE PÉDOLOGIE

Depuis 1945, la Pédologie Française, sous l'influence prédominante de nos collègues de l'O.R.S.T.O.M., est une pédologie classique, dans le droit fil des grands précurseurs russes de la fin du XIX^e siècle : ДОКОУЧАЕВ, СИБИРЦЕВ, КОСТЫЧЕВ. Mais les pédologues de l'O.R.S.T.O.M. lui ont donné, à travers leur enseignement et à travers leurs travaux une orientation particulière.

En ce qui concerne G. AUBERT, il faut chercher les traces écrites de ses publications personnelles avec patience, dans la correspondance, dans les lettres aux pédologues qui furent pendant plus de vingt ans le bulletin de liaison de l'équipe de l'O.R.S.T.O.M. et de bien d'autres, dans les comptes rendus des congrès et des réunions internationales, dans les comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de 1955 à nos jours qui gardent la trace de plus de 70 communications ou présentations ainsi que de multiples interventions orales.

Avec son équipe de l'O.R.S.T.O.M., mais aussi avec toute une série de chercheurs qui étaient ses anciens élèves, ou qui profitaient de son enseignement au hasard des tournées, ceux qui arrivaient à s'agglomérer au « cirque » AUBERT à Madagascar comme au Maroc, au Tchad comme en Bretagne, celui-ci a profondément marqué la réflexion de toute une génération de Pédologues.

J'irai même jusqu'à dire que son souci d'envisager tout le champ du possible, son grand libéralisme tempéré par une intuition rarement en défaut faisaient naître chez ses partenaires, et ce n'est pas le moindre de ses talents, un souci de rigueur et une recherche d'absolu qui ont conduit certains de ses élèves à être plus affirmatifs, voire à prendre des positions beaucoup plus arrêtées que les siennes.

Il reste à l'auteur de ces lignes à s'interroger à son tour sur la question du Président de l'Académie d'Agriculture : comment l'École Pédologique Française a-t-elle pu se développer si rapidement, et quel a été le rôle moteur de celui qui en a été le dénominateur commun ?

Je répondrai par le portrait suivant :

- Un dynamisme et une vitalité hors de l'ordinaire qui nous ont tous épuisé un jour ou l'autre.
- Une intuition et un sens de la complexité de la nature qui nous ont évité bien des impasses et des erreurs.
- Un libéralisme qui nous a permis d'explorer, parfois loin du maître, des voies nouvelles et originales.
- Et, en même temps, une solidité, un monolithisme, une permanence, un refus des aventures qui prenaient souvent la forme d'un bon sens paysan qui a inspiré confiance et multiplié les utilisateurs de la Pédologie.
- Par-dessus tout, un enthousiasme, toujours juvénile, communicatif, chaleureux.

Georges AUBERT a su voir et faire voir un objet nouveau. Il nous a rassemblés, formés, guidés, autour de cette vision commune du sol. Il a su imposer cette vision, nouvelle en France, et il a su lui donner sa touche personnelle. Il a su nous permettre d'ajouter les uns et les autres les nuances successives de nos thèses successives. Il a su faire pénétrer cette vision dans les milieux scientifiques, administratifs, et techniques. D'autres vont vous dire, mieux que moi, ce qu'il a fait en outre dans d'autres domaines.

Mais je terminerai en citant, après lui, l'un de ceux qui marqua sa jeunesse : TEILHARD DE CHARDIN, dont il rappelait dans son discours de 1970 à la présidence de l'Académie d'Agriculture, le triple objectif qu'il avait fait sien :

*Chercher pour savoir,
Savoir pour créer,
Savoir pour être.*

BIBLIOGRAPHIE

- Actes de la Quatrième Conférence Internationale de Pédologie, 1924, Rome.
- AGAFONOFF (V.), 1939. — Les étapes des analyses chimiques et minéralogiques du sol. *Bull. A.F.E.S.*, t. V, nos 2-1939 : 125-133.
- AUBERT (G.), 1937. — Les recherches pédologiques aux colonies. *Bull. A.F.E.S.*, t. III, n° 3, sept., Paris : 242.
- AUBERT (G.) et DUCHAUFOUR (Ph.), 1946. — Les sols du domaine d'Harcourt. *C.R. Ac. Agric. de France*. Paris : 721-728.
- AUBERT (G.), 1954. — Les sols tropicaux. *C.R. 8^e Cong. Int. de la Science du Sol. G.L. 6, Bucarest* : 213-229.
- AUBERT (G.), 1955. — Réception de M. Georges AUBERT, nouveau membre titulaire. Étude des sols de la France d'Outre-Mer. La X^e session du Comité consultatif de l'U.N.E.S.C.O. sur les zones arides. *C.R. Ac. d'Agric. France*. Paris.
- AUBERT (G.), 1957. — Sur quelques aspects de la Pédologie et Classification et Cartographie. *C.R. Ac. d'Agric. France*. Paris.
- AUBERT (G.), 1960. — Classification et cartographie des sols : observations à la suite du VII^e Congrès international de la Science du Sol. *C.R. Ac. d'Agriculture de France*. Paris.
- AUBERT (G.), 1968. — Présentation d'ouvrages : Évolution des sols, par Ph. DUCHAUFOUR. Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols, par A. RUELLAN et G. DELÉTANG. *C.R. Ac. d'Agriculture de France*. Paris.
- DEMOLON (A.), 1938. — Notice bibliographique. J. BAUYENS. Les sols de l'Afrique Centrale. *Bull. A.F.E.S.* Paris.
- DROUINEAU (G.), 1935. — Évolution comparée d'un sol de limon sous couverture forestière et à découvert. *Bull. A.F.E.S.*, t. I, nos 1 et 2. Paris.
- UDIN (A.), 1937. — Classification pédologique et cartographie des sols de France. *C.R. Ac. d'Agric. de France*, t. 23 : 414-423. Paris.
- UDIN (A.), 1937. — Classification pédologique des sols. *Bull. A.F.E.S.*, t. III, n° 2 : p. 105.
- RADET (E.) et MANTELET (C.), 1937. — Étude pédologique des sols des plateaux jurassiques dans l'Est de la France. *Bull. A.F.E.S.*, t. III.
- ROBINSON (G. W.), 1951. — Soils. Their origin, constitution and classification. Thomas Murby and Co. Londres.
- SMITH (G.) et TAVERNIER (R.), 1957. — The concept of braunerde (Brown forest soil) in Europe and the United States. *Advances in Agronomy. Vol. IX*. New York.

Pédologie et Agronomie : du concept de « Vocation » au concept d'« Aptitude » des sols

Stéphane HÉNIN

Une présentation de l'œuvre de G. AUBERT serait incomplète si l'on n'évoquait pas les relations entre pédologie et agronomie.

La générosité foncière de notre ami, son sens du devoir entrent certainement pour une part dans l'enthousiasme qu'il a apporté à étudier les sols. C'est parce que l'étude de ces derniers pouvait être utile à l'agriculture et en particulier à l'amélioration de celle-ci dans les pays en voie de développement que se trouvait justifié à ses yeux le temps qu'il y a consacré.

Devant cette assemblée où dominent les pédologues ayant travaillé outre-mer, il est bon de rappeler l'activité dont notre ami a fait preuve pour aider les agriculteurs français, en particulier dans le cadre des C.E.T.A.

On peut dire que de tous temps les agronomes se sont préoccupés de la qualité des sols dont ils envisageaient la culture. Les critères utilisés étaient évidemment au niveau des connaissances générales de l'époque : l'état de la végétation pour XÉNOPHON, quelques critères physiques pour les agronomes latins et même pour OLIVIER DE SERRES qui affirmait pourtant que « la base de l'agriculture était la connaissance naturelle des terroirs ».

C'est bien à une préoccupation de ce genre que la Pédologie doit sa naissance. C'est en effet, dans le but de trouver une base objective aux impositions foncières et, pour envisager les méthodes à utiliser pour combattre les famines qui désolaient périodiquement certaines régions de la Russie que la Société Libre Impériale de Saint-Petersbourg a confié à DOKOUTCHAEV le soin d'étudier leurs sols. A mesure que la pédologie s'est développée, on a toujours retrouvé ce souci de faire correspondre à un type de sol des potentialités agricoles. Les productions les mieux adaptées à un type de sol définissaient sa *vocation*. C'est là une attitude simpliste, mais il est tellement commode de pouvoir l'adopter ! Faire correspondre un type de sol à une culture, c'est permettre de préparer les plans de développement et d'utilisation du sol, espoir de tous les décideurs ; d'ailleurs, l'existence possible d'une relation stricte entre « *caractéristiques des sols* » et « *types de culture* » s'est traduite depuis longtemps dans le langage par des expressions telles que « terre à blé », « terre à betteraves », etc.

Suivant les idées qui avaient cours alors dans la recherche agronomique, notre ami faisait présenter en 1943, à l'Académie d'Agriculture, une note à propos des types pédologiques de certaines régions de l'Ouest de la France et de leur vocation. Mais rapidement, il ne devait pas se satisfaire d'une démarche aussi simpliste.

En effet, parler de « *vocation des sols* » revient à admettre qu'il est possible d'établir une relation stricte entre un ensemble représenté par des unités de sols et un autre ensemble constitué par des unités caractérisant l'activité agricole. A quel niveau de la classification taxonomique le pédologue doit-il se placer et quels sont les concepts que doit utiliser l'agronome pour tenter d'établir les correspondances cherchées ?

Sauf dans le cas de monocultures ou de cultures pérennes de longue durée, on ne peut raisonnablement parler d'une culture particulière puisque celle-ci va se placer dans le cycle d'une rotation.

Il faut donc reprendre l'examen de l'ensemble des facteurs permettant de caractériser le milieu physique et, parallèlement, l'ensemble des systèmes permettant d'analyser les activités agricoles.

Le milieu physique se définit à partir de données, qui relèvent de disciplines telles que la météorologie, la climatologie, l'orographie, l'hydrographie et bien entendu la pédologie.

Les données qu'elles fournissent ne sont pas indépendantes bien que parfois les relations qui existent entre elles soient implicites et relativement discrètes. C'est ainsi qu'entre l'étude de la météorologie et la climatologie, il existe des relations subtiles.

Les météores telles que les précipitations atmosphériques par exemple sont des phénomènes aléatoires qui varient largement dans le temps en fréquence et en intensité.

Lorsque nous passons à un climat, nous prenons leurs valeurs moyennes et l'on considère la quantité d'eau tombée pendant une période déterminée, par exemple un mois. Or, sauf peut-être dans des cas extrêmes, si ces précipitations étaient tombées sur un tas de graviers, l'humidité ne permettrait pas le maintien d'une végétation, alors qu'elle est largement suffisante pour assurer sur un sol, la croissance d'une culture.

Cela veut dire qu'il existe dans le milieu naturel une propriété qui va permettre l'accumulation des quantités d'eau tombée et qui représente concrètement l'opération arithmétique qu'effectue l'observateur lorsqu'il calcule la somme des précipitations recueillies dans un pluviomètre. Ce sont les propriétés du sol, et plus précisément sa capacité pour l'eau, qui lui confèrent ce rôle de mémoire permettant de passer des données de la météorologie aux réalités de la climatologie.

Par conséquent, faire référence à telle ou telle discipline n'amoindrit pas pour autant l'importance des connaissances recueillies par d'autres spécialistes.

Il n'en reste pas moins que dans une circonstance particulière, un petit nombre de caractéristiques du milieu peuvent avoir une influence déterminante sur son utilisation.

C'est ainsi que l'analyse de l'habitat peut se faire suivant une hiérarchie définie par le nombre de disciplines mises en cause, en particulier en fonction du rôle déterminant qu'elles peuvent avoir. En ce qui concerne nos problèmes, c'est à l'échelle de l'intervention de l'agriculteur vis-à-vis du milieu que les caractères du sol ont une influence plus ou moins prépondérante.

Si l'on se tourne vers les activités agricoles et qu'on les caractérise par des concepts en passant des plus généraux aux plus particuliers, on peut établir la hiérarchie suivante.

On trouve tout d'abord le « système agraire » qui, suivant une définition récente de VISSAC et HENTGEN, est l'« association dans l'espace, des productions mises en œuvre par une société, en vue de satisfaire ses besoins ». A ce niveau, le problème humain est déterminant et il est évident que suivant le développement d'un pays, nous verrons dans un même milieu, se développer des systèmes agraires très variés. Tant que la circulation des biens n'est pas assurée, le système agraire vise à satisfaire l'ensemble des besoins, il est autarcique. Comme le milieu ne se prête pas toujours à toutes les productions, les modes de vie, en particulier d'alimentation, seront basés sur certaines productions adaptées : fruits, céréales, élevage. A ce niveau de généralité, les paramètres climatiques et l'orographie dominent les caractéristiques des sols ; par exemple, il n'existe pas de grandes cultures dans des régions à relief tourmenté. Nos paysages agraires sont le reflet de ces situations et l'on retrouve ce type d'analyse dans les travaux de G. AUBERT lorsqu'il parle avec F. FOURNIER, des « cartes d'utilisation des terres » dans « *Sols Africains* ». Aussi, dans un contexte économique et écologique donné, on peut parler de « *vocation régionale* ».

Mais l'agronome parle aussi des « *systèmes de production* » : c'est l'association sur une exploitation donnée, d'un certain nombre d'activités permettant de produire des biens d'une manière relativement sûre et rentable ; il s'agit en général d'activités qui vont permettre d'utiliser pendant la plus grande partie de l'année, le potentiel de travail disponible, de même que la complémentarité des productions. C'est le cas typique des systèmes de polyculture associés ou non à l'élevage (Polyculture élevage).

Cette notion de « système de production » pourrait s'intégrer dans le concept de « *système agraire* » dont il n'est qu'une composante. Il n'en reste pas moins que c'est le choix du système de production qui déterminera l'affectation des terres à certaines activités.

L'agronome envisage également, particulièrement pour les activités les plus intensives, le « *système de culture* » : il s'agit alors, de considérer les assolements et les rotations. La notion d'assolement vise également un choix de production qui permette une utilisation régulière et harmonieuse du potentiel de travail. La notion de rotation qui a malheureusement été souvent confondue avec celle d'assolement, concerne une succession de productions dans un milieu donné, de manière à permettre de les réaliser dans les meilleures conditions techniques ; chacune des cultures trouvant un milieu qui physiquement, chimiquement et biologiquement a été préparé par la culture précédente. Ce sont les concepts de « *fatigue des sols* », de « *temps de repos* », de culture

« étouffante », « nelloyante », ou « salissante », le problème des inoculum qui constituent alors les données permettant de choisir les rotations optima.

Bien entendu, ces concepts ont été élaborés par les agronomes traditionnels. Les progrès techniques ont consisté à permettre à l'agriculteur de s'affranchir des contraintes exprimées par ces concepts qui n'ont actuellement d'intérêt que par leur généralité. Les problèmes d'« état physique » sont plus ou moins résolus par la diversité des instruments de travail du sol ainsi que le choix des itinéraires techniques suivant lesquels ils interviennent. Le problème chimique est réglé par les fertilisants, et l'on demande aux pesticides d'assurer la défense des cultures.

Que deviennent alors les « propriétés des sols » ? Elles vont réapparaître quand on repose le dilemme auquel se trouve affronté non seulement l'exploitant mais tous les responsables du développement agricole. Il s'agit de savoir si l'on va s'adapter ou adapter.

S'adapter veut dire que l'agriculteur ou les chargés du développement vont affecter les diverses productions en fonction des propriétés du milieu, parmi lesquelles se placent celles qui sont liées aux propriétés des sols et à leur fonctionnement. Cela est particulièrement net pour les végétations pérennes telles que les productions fruitières, le choix des essences forestières, le maintien des prairies. Évidemment, il est rare qu'en s'adaptant au milieu, l'homme reste entièrement passif ; il tente toujours d'optimiser plus ou moins la situation, ne serait-ce qu'en implantant ou en favorisant les espèces et les variétés les plus convenables : on sème du dactyle dans les terres relativement légères, la fétuque dans les terrains déjà plus difficiles subissant alternativement des périodes de sécheresse ou d'excès d'humidité, et l'on pourrait multiplier les exemples.

Les cartes d'utilisation des sols traduisent le résultat de cette confrontation entre les propriétés du milieu et les tentatives d'adaptation. Mais cela ne suffirait certainement pas à définir des « vocations » !

Affecter une zone en pente située en adret, à une production fourragère, n'implique pas nécessairement qu'elle assure la meilleure production de l'herbe ; *a priori*, la situation paraît plutôt défavorable, sauf en climat humide. Par contre, il est très évident que les travaux culturaux sont alors très difficiles voire même dangereux et que par ailleurs, ces zones sont sensibles à l'érosion : leur mise en culture amènerait non seulement leur dégradation, mais risquerait d'entraîner celle de terrains qui se trouvent en aval. Il n'y a donc pas « vocation » à proprement parler. Si l'on considère des zones relativement planes, ce sont alors les propriétés des sols qui peuvent apparaître comme élément déterminant. Mais là encore, il faut distinguer entre l'implantation de végétation permanente, pâturage ou forêt, et l'implantation de cultures annuelles ou temporaires de courte durée. Ce sont souvent les mauvaises qualités physiques des terrains qui déterminent ces choix. On peut citer comme exemple des plantations forestières dans un certain nombre de sols podzolisés ou caillouteux, celles de prairies dans des terrains hydromorphes. Il s'agit là encore d'une vocation négative, c'est-à-dire de terrains dans lesquels compte tenu des techniques et des connaissances de l'heure, on choisit la solution la moins mauvaise pour en tirer parti. On peut dire qu'il y a choix en fonction des aptitudes.

Si l'on considère maintenant l'adaptation du milieu, celle qui va permettre d'implanter les productions considérées comme les plus rentables, il faut distinguer deux grands types d'intervention :

- LES AMÉLIORATIONS FONCIÈRES,
- LES ITINÉRAIRES DE PRODUCTION.

Les améliorations foncières, expression dont il faut élargir le sens à toute opération ayant pour but d'amener les propriétés du milieu à un état permettant de l'exploiter intensivement, impliquent une connaissance détaillée des sols. C'est certainement le domaine dans lequel les données de la pédologie peuvent être exploitées de la manière la plus directe et la plus utile.

Il est évident que lorsqu'il s'agit de corriger le régime des eaux, l'implantation du drainage et le choix des moyens, la modification des profils qu'il s'agisse du sous-solage, du retournement ou de l'empierrement, la connaissance des sols est fondamentale. C'est d'ailleurs particulièrement la géométrie du profil et son fonctionnement qui sont en cause.

Mais il faut aussi envisager les problèmes de dessalage, les corrections d'acidité, les fumures de fond, en particulier l'enrichissement en phosphore ainsi que la teneur en oligo-éléments. C'est alors toute l'histoire du profil qui peut être déterminante puisqu'il faut prendre en compte la richesse des roches mères et les processus géochimiques ayant abouti à sa différenciation.

Si l'on considère maintenant le choix des itinéraires de production, le poids des propriétés du milieu est beaucoup plus difficile à apprécier. D'ailleurs, comme il s'agit non pas d'une culture mais d'une série de cultures, les propriétés favorables à l'une d'elles peuvent être moins favorables aux autres et c'est ce que montrent les

« effets blocs » dans les expériences de rotation. Ces effets sont souvent à la limite de la signification puisque l'on a choisi des terrains en principe homogène. Néanmoins, ils existent. En voici un premier exemple :

	1	2	3	4
Pois.....	21,6	16,5	13,7	13,6
Blé.....	40,1	41,3	40,0	46,5
Colza de printemps.....	8,8	8,1	11,7	9,4

Sur le bloc 1, on observe le meilleur rendement en pois et un mauvais rendement en colza alors que l'inverse s'observe pour le bloc 3. Quant au bloc 4, seul le blé y fournit un rendement élevé.

Le second exemple correspond à un essai de travail du sol. En comparant des « effets blocs », on fait apparaître les possibilités du milieu tous traitements confondus.

N° du bloc, rendements qx/ha	1	2	3	4
Résultats moyens sur				
neuf ans.....				
} Blé....	48,9	59,0	57,9	53,7
} Maïs..	65,1	64,9	64,2	63,9

Des différences très nettes se manifestent sur le blé, alors que les rendements des blocs ne sont pas significativement différents pour le maïs.

Ces données conduisent à formuler deux remarques. Les différences de rendement correspondent bien à des variations dans la nature du sol et en particulier dans le premier exemple. Mais il faut noter que les parcelles sont travaillées et semées aux mêmes dates. Il est possible, et certaines observations plaident en faveur de cette hypothèse, qu'en adaptant les conditions de culture et les dates d'intervention à ces différentes parcelles on puisse obtenir des rendements identiques sur ces parcelles. C'est peut-être ce qui explique l'égalité des rendements en maïs dans l'essai de travail du sol, puisque l'on applique 3 modes de préparation du sol différents dans chaque bloc ce qui nivelle les effets du milieu.

Il est évident que si l'on en revient au problème que pose la correspondance entre nature des sols et productivité, on se heurte ici à une difficulté considérable puisqu'on ne peut pas mettre en présence d'un type de sol, une conséquence agronomique précise, pour l'ensemble de la rotation concernée.

Les données fournies par la pédologie doivent être alors adaptées aux questions. Il est des cas où la réponse est évidente; par exemple, l'irrigation devient presque impraticable dans les terrains très battants, car l'eau doit y être apportée avec de telles précautions que la technique devient pratiquement inutilisable. En poussant plus loin la recherche de corrélation à un niveau d'analyse beaucoup plus fin, STENGEL a pu définir à la suite d'une expérimentation de terrain, les types de texture permettant d'utiliser le semis direct, ou le labour.

C'est alors que la connaissance des propriétés des sols ne peut prendre son utilité qu'à la suite d'une confrontation étroite entre les pédologues et les agronomes. Mais cela implique que ces derniers puissent à leur tour, poser des questions précises, et malheureusement, celles-ci nécessitent des observations préalables. Ces dernières sont d'autant plus difficiles à réaliser qu'en particulier avec les cultures annuelles, les outils, les produits de traitement et les variétés changent rapidement. Or, il suffit que l'on dispose d'un nouvel outil de travail du sol pour lever certaines contraintes découlant de sa constitution. L'existence de machines à broyer les pierres change radicalement les possibilités d'utilisation de certains terrains caillouteux par exemple, et les itinéraires de travail du sol de la disponibilité d'herbicides spécifiques.

Comme les données recueillies par le pédologue sont beaucoup plus stables, il lui est évidemment possible d'établir, à partir d'un certain nombre d'hypothèses concernant leur utilisation, toute une série de cartes thématiques. De tels documents peuvent avoir une valeur d'orientation pour l'agronome dans la mesure où ils font apparaître des contraintes auxquelles il faut s'adapter ou qu'il faut lever.

C'est ce qu'avait fort bien compris notre ami AUBERT dans un remarquable document de synthèse préparé en collaboration avec notre collègue TAVERNIER et présenté à Londres en 1970.

Il s'agit d'un recensement de divers types de cartes représentant les différentes propriétés du milieu physique, représentation accompagnée de considérations sur l'utilisation qui pouvait en être faite.

Cette distinction est intéressante parce qu'elle rejoint une attitude du père de la pédologie. Il est tout à fait remarquable que ДОКΟΥЧАЕВ lui-même, sollicité de faire une étude des sols pour préparer l'assiette des impositions foncières par les groupements agricoles de la région de Nijni Novgorod, n'accepte cette mission qu'à la condition qu'elle comprenne deux parties distinctes :

— une étude du sol proprement dite suivant les méthodes naturalistes qu'il avait appliquées aux tchernosioms, c'est-à-dire une description des propriétés des profils et une interprétation génétique des liaisons qui peuvent exister entre ces caractères;

— une étude économique et statistique ayant pour base la cartographie précédente.

C'est là une solution de sagesse, car la connaissance scientifique des mécanismes de la formation et de l'évolution des sols, constitue une base cohérente dont il ne faut pas altérer l'homogénéité, ainsi que l'affirme le fondateur de la Pédologie. Il est possible qu'une telle activité n'ait pas, dans l'immédiat, la même utilité qu'une cartographie qui voudrait prendre en compte certains critères dont la connaissance semblerait mieux répondre à court terme aux problèmes à résoudre.

Le grand danger que court la pédologie est certainement l'intérêt qu'ont su éveiller pour cette discipline les hommes qui s'y sont consacrés. Parce que l'on peut parler de « type de sol » comme d'êtres définis, les décideurs ont tendance à vouloir les utiliser comme s'il s'agissait effectivement d'objets; en fait, ce sont des concepts permettant de regrouper, à travers les processus évolutifs qu'ils impliquent, un ensemble de fonctions, d'en déterminer la cohérence. Mais cette connaissance ne prendra toute son utilité que dans la mesure où ces fonctions seront elles-mêmes ré-incorporées à un système, celui qui implique la mise en place d'un système de culture et le développement des espèces qui le composent.

C'est-à-dire que le pédologue doit se résoudre à admettre que ses connaissances n'ont de valeur techniquement parlant que relativement à une certaine finalité. Il faut également que ceux qui veulent en utiliser les données, sachent se plier à cette exigence.

L'œuvre considérable des fondateurs de la pédologie à la fois comme discipline et comme service, et nul en France plus que notre ami AUBERT ne mérite mieux ce titre, doit être poursuivie dans sa pureté conceptuelle. C'est à mon avis le plus sûr moyen de fournir aux utilisateurs potentiels que sont les agronomes, les informations dont ils auront besoin lorsqu'il s'agira d'assurer dans des contextes socio-économiques variables, la satisfaction des besoins des hommes, c'est-à-dire de répondre à la plus noble des motivations de celui que nous fêtons aujourd'hui.

LES TRAVAUX LES PLUS CARACTÉRISTIQUES DE G. AUBERT CONCERNANT LES APPLICATIONS DE LA PÉDOLOGIE A L'AGRONOMIE

AUBERT (G.), 1967. — Classification Pédologique, Cartographie des Sols et Mise en valeur des Terres. *Annales de Edafologia y Agrobiologia*. Tome XXVI, n^{os} 1-4 Madrid.

AUBERT (G.), 1973. — Les Recherches de base et le développement C.R. 10^e Colloque de l'Institut International de la Potasse Abidjan/Côte d'Ivoire.

AUBERT (G.), 1970. — Utilisation rationnelle et protection des cycles biogéochimiques des sols. Colloque d'Orléans.

AUBERT (G.), 1968. — Collaboration F. FOURNIER, V. ROZANOV, *Secrétariat F.A.O.* Soil and the maintenance of their fertility as factors affecting the choice of use of land F.A.O. Unesco. Conservation and rational use of the environment, document E/4458, 12 March 1968.

AUBERT (G.), 1965. — Contribution de la Carte Pédologique à une limitation raisonnable de l'extension de l'agriculture sans bétail. *Acad. Agri. de France*. Séance 24 mars 1965 : 384-388.

AUBERT (G.), 1969. — Le Centre de Recherches sur l'utilisation de l'eau salée en irrigation en Tunisie. *Acad. Agri. de France*. Séance du 12 novembre 1969 : 1115-1120.

AUBERT (G.), 1971. — Unesco. Programme des Nations Unies pour le développement. Gouvernement Tunisien. Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. *Acad. Agri. de France*. Séance du 10 mars 1971 : 379-381.

AUBERT (G.), 1943. — Rapports entre les caractères des sols (types génétiques et nature des roches mères) et leur vocation culturale. *Acad. Agri. de France*.

AUBERT (G.) et FOURNIER. — Les cartes d'utilisation des terres. « *Sols africains* ». Vol. III, n^o 1, revue trimestrielle publiée par le Bureau Interafricain des sols et de l'économie rurale.

AUBERT (G.), 1970. — La Cartographie des Sols. Groupe de travail sur les sols tropicaux. *Acad. Sci. U.S.A.* Londres.

Apport de la pédologie à la géologie de la surface

Georges MILLOT

*Institut de Géologie
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg*

Je vais plaider que les relations tissées entre les Pédologues de l'O.R.S.T.O.M. et les Géologues, en France, ont fortement marqué notre communauté des Sciences de la Terre.

Mais, et vous l'avez souligné tout à l'heure, les liens de consanguinité entre les Pédologues de l'O.R.S.T.O.M. et de l'I.N.R.A., et ceux de divers labos, des Écoles, du C.N.R.S. et des Universités sont tels que je m'adresse à la famille des pédologues dans son ensemble. De plus, je ne citerai pas de noms propres. Vos travaux sont si nombreux et si importants que plusieurs lacunes seraient inévitables.

Il ne s'agit pas, pour moi, de décerner des compliments, mais de vous dire comment je vois les grandes lignes du Renouveau, que la Géologie vous doit à vous, pédologues, tous plus ou moins à la fois disciples de nos trois Maîtres : Georges AUBERT, Philippe DUCHAUFOUR et Stéphane HÉNIN.

Introduction

Dans le passé que j'ai vécu comme étudiant, la Pédologie était inconnue des Géologues communs. Elle ne prenait aucune place dans l'enseignement. Il est sûr que mon exemple est archaïque, puisque j'ai fait mes études avant la guerre, mais entre la Propédeutique et l'Agrégation, je n'ai jamais entendu parler de sols.

Je ne sais à quelle vitesse cette situation a changé, mais aujourd'hui, il est clair que, grâce aux pédologues, de nouveaux objets entrent dans le champ d'étude des Sciences de la Terre. Ces objets, les sols, se trouvent à une extrémité du cycle géochimique, à l'opposé de l'enfouissement par subsidence ou subduction. Et ces objets sont à la frontière de la biosphère et de l'atmosphère.

Cela est d'une grande importance pour le géologue. Le cycle géochimique serait aujourd'hui incompréhensible sans votre contribution.

Je regarderai l'influence des travaux des Pédologues sur les Sciences de la Terre par rubriques successives, sans prétendre que tout soit envisagé. Je vous présente un essai.

1. NOUVEAU REGARD SUR LES PHÉNOMÈNES D'ALTÉRATION

Altérations et Sols

Si le géologue ignorait les sols, il envisageait les altérations sans le secours de ces derniers. Il était tout à fait content de voir, distingués dans les traités, le profil pédologique et la zone d'altération. Il ignorait le premier et raisonnait sur la seconde. En fait, cette frontière n'existe pas. La pénétration des racines ou des termites à 10, 20 ou 30 m de profondeur, est un exemple qui montre que la vie des sols pénètre profondément les altérites.

Autre exemple, l'un d'entre vous a trouvé des cutanes à 120 m de profondeur, à la base du profil d'altération ferrallitique de Conakry, où fut défini l'iso-volume. Et cela trahit le lessivage dès le front d'altération.

Vos travaux ont montré, d'une manière croissante, le rôle de la vie, des matières organiques et des restructurations proprement pédologiques dans l'altération elle-même. Nous ne savons plus si nous devons dire « couverture pédologique » ou « couverture d'altération », pour désigner ce manteau transformé à partir des roches mères. Si les structures, et donc les volumes, sont conservés dans la zone inférieure où les altérations hydrolytiques dominent, si le sommet des profils voit des remaniements considérables des structures et des pertes de volume, il nous faut tirer la leçon que voici : « Dans une couverture unique (pédologique ou d'altération, selon le vocabulaire de chacun), interfèrent les phénomènes d'altération proprement hydrolytique (ou géochimiques ?) et les phénomènes proprement pédologiques ». Et c'est sous votre influence que les géologues s'instruisent de cette interférence.

2. NOUVEAU REGARD SUR LA SÉDIMENTATION

Tout géologue attribuait la matière sédimentée à l'érosion du continent : matière en solution, matière figurée, minérale ou organique en suspension. Mais il négligeait qu'une part importante de ce matériel avait été touchée et, parfois, gravement transformée par la Pédogenèse. Aujourd'hui, de nombreux travaux cherchent à reconstituer, dans l'étude des sédiments, la nature des climats contemporains de leur dépôt. Et certains géologues marins, enregistrent, dans les carottes prélevées par forage en mer, les oscillations climatiques du continent.

Il ne faut naturellement rien exagérer, comme on en fut tenté naguère, en disant que toute la matière des sédiments est de nature pédologique originelle. Existente aussi les produits de l'érosion directe des chaînes et des continents, par les glaciers, les torrents, etc. On doit y ajouter l'apport direct des volcans, soit par la voie aérienne, soit par la voie sous-marine.

Mais l'affaire rebondit. Car les modèles pédologiques sont maintenant utilisés pour rendre compte de la sédimentation dans les grands fonds océaniques, loin des apports des continents. On nous dit que les argiles rouges des grands fonds sont entièrement néoformées, ce qui est tout le contraire de ce que nous avons appris. Et ces argiles nourrissent les nodules ferrugineux sous-marins, parfois précieux parce que polymétalliques. On nous décrit, dans ces grands fonds, les altérations du matériel biologique ou volcanique sédimenté et des migrations et nodulations dans les profils sous-marins. On parle de pédogenèse sous-marine dans ce cas et dans d'autres.

Ici encore, le géologue devra être prudent. Les formules analogiques imaginées sont utiles mais, dans ces phénomènes sous-marins, il sera convenable de faire une liste des analogies en question. Puis, il sera bon de distinguer ce qui n'est vraiment qu'analogie, par ressemblance ou convergence, de ce qui est vraiment homologue par unité de mécanisme. Dans ce dernier cas, se trouve la néoformation des montmorillonites ferrières et nontronites des grands fonds.

Voici divers chantiers où vos travaux précèdent et éclairent ceux des géologues. On pourrait dire de même, pour rendre compte de la chimie des eaux des sources, des nappes, des lacs, des bassins évaporatoires, etc.

3. LES SYSTÈMES GÉOCHIMIQUES DE TRANSFORMATION

Vous nous avez fourni des modèles de transformation de la nature et de la structure de vos couvertures pédologiques, qui sont transposables à nos propres objets d'étude :

(1) Je pense aux modèles verticaux qui appartiennent à toute la tradition de votre discipline, avec l'organisation d'horizons, au sens étymologique du mot. Je pense aux modèles latéraux, reconstitués le long des versants et dont vous avez minutieusement décrit les étapes de transformation.

(2) Ici ne sont évoquées que les transformations dans l'espace. Mais vous avez pu les étudier dans le temps. Vous avez pu démontrer les systèmes de transformation « autorégulés », qui évoluent par leur jeu spontané, tandis que les conditions externes, climatiques, tectoniques ou autres restent constantes. Comme une forêt qui secrète elle-même les chemins de son extension ou de sa mort, le système évolue par lui-même. C'est le système biogéodynamique autonome. Mais il en est aussi qui sont assistés ou hâtés par le changement du milieu. Parmi ces derniers, vous avez décrit les déséquilibres pédobioclimatiques, engendrés par changement climatique ou tectonique ou hydrographique. Si tel ou tel des facteurs externes franchit un seuil, la couverture « tombe » en déséquilibre et change de nature, de structure et de dynamique.

(3) Plus généralement, dans les systèmes de transformations pédologiques, vous avez montré que marchent de pair, construction et destruction. On pourrait faire une analogie avec un organisme qui abrite constamment anabolisme et catabolisme. A chaque instant, minéraux ou structures se détruisent, mais nourrissent ici ou là, à toutes les échelles, minéraux et structures nouvelles. Et ainsi de suite. Et avec patience, vous reconstituez la suite ordonnée des organisations dans leur nature et leurs structures. Vous avez agi de même pour la matière organique et, aujourd'hui, pour les organisations organominérales. Quand les constructions l'emportent, profils, couvertures, cuirasses, systèmes s'édifient. Quand les destructions dominent, le système se dégrade et l'on peut en interpréter les reliques. Vous décrivez même des systèmes qui se dégradent à un bout ou à leur sommet et se construisent à l'autre bout ou à leur base, tout en sachant qu'un système qui se dégrade en élabore un autre. Vous parvenez à la reconstitution synchronique et diachronique des structures successives.

Tous ces raisonnements sont précieux pour nous qui travaillons, à plus grande profondeur, les altérations sous couverture ou diagenèses de nappe, la diagenèse en général, les altérations hydrothermales et nombre d'accumulations minérales.

4. NOUVEAU REGARD SUR LES ACCUMULATIONS MINÉRALES, EXOGÈNES OU MÉTÉORIQUES

Nous tendons ici la main à la Métallogénie. Vous avez tous les exemples à la pensée : cuirasses ferrugineuses, cuirasses bauxitiques, gisements de nickel, gisements de manganèse, croûtes calcaires dont certaines recèlent des terres rares, dalles siliceuses dont certaines sont métallifères. Vous fournissez aux géologues toute une série de modèles, où des métaux en petite quantité sont mobilisés pour aller se piéger ailleurs ou, au contraire, accumulés sur place, en raison de la mobilité plus grande des autres.

Aucun des progrès faits en France, en Métallogénie de surface n'aurait pu être accompli sans les progrès de votre discipline.

Nombre de systèmes d'accumulation privilégient un élément, sinon un minéral, plutôt que les autres. Peu à peu, le système soumis aux agents météoriques tend vers ce que j'appelle le statut monominéral. Plus il en est proche, plus riche est le gîte. Vous avez défini l'accumulation relative d'un élément par départ des autres constituants. Vous avez défini l'accumulation absolue par apport, mais on en a vu bientôt, au moins deux modalités. D'abord, l'accumulation absolue par remplissage de vides. Puis, vous avez permis d'illustrer le deuxième mécanisme, celui de l'épigénie, par remplacement isovolume. Et dans les systèmes météoriques, se multiplient les exemples : épigénies calcaires, épigénies ferrugineuses ou siliceuses, épigénies manganésifères ou nickélifères, etc.

Tous ces mécanismes sont applicables à nombre de gîtes météoriques, mais aussi à des gîtes sédimentaires nourris dans la diagenèse par circulation de fluides. Tout progrès dans une discipline a son écho dans sa voisine.

5. PRÉPARATION DE L'ÉROSION. FORMES DU RELIEF. APLANISSEMENTS

Les livres nous ont toujours dit que l'altération préparait l'érosion des continents. Oui, mais comment ? Vos travaux sur les couvertures pédologiques ou couvertures d'altération ont fait progresser ces questions. Je ne fais qu'énumérer. Ont été expliqués par vos systèmes, des dépressions au cœur de certains plateaux, la genèse d'un chevelu fluvial, le changement de pente d'un glacis, la dépression annulaire autour des inselbergs, la rectification des modelés cuirassés, la rectification des paysages encroûtés, l'abaissement des interfluvies dans une pédiplaine, menant à la coalescence des glacis, les aplanissements généralisés, menant aux paysages de Sahel, puis de désert. Plusieurs chapitres de la genèse des formes du relief sont visités par vos travaux sur les évolutions internes, puis superficielles, des couvertures. On remarquera qu'au fur et à mesure qu'on marche des pays humides vers les pays arides, on favorise le latéral vis-à-vis du vertical, le superficiel vis-à-vis de l'interne, le particulière vis-à-vis de la dissolution, l'ablation mécanique de surface vis-à-vis des hydrolyses hypodermiques. Autant de vues fertiles qui s'offrent à nous.

6. GÉOLOGIE HISTORIQUE

Je terminerai par une vue plus générale encore : le rôle du progrès de la Pédologie en Géologie historique. Ici vient la compréhension meilleure des paléaltérations et des paléosols, souvent inclus dans la colonne

stratigraphique. Certaines formations calcaires, siliceuses ou autres, prises pour des sédiments, se révèlent être d'anciennes accumulations pédologiques. On débouche sur la Paléoclimatologie, encore que les géologues doivent travailler avec prudence pour ne pas déduire d'une manière caricaturale un climat et un paysage à partir de modestes reliques, difficiles à interpréter. Mais le travail avance.

Je citerai une entreprise intéressante que certains d'entre vous appellent la « continentalisation » des couvertures sédimentaires. Quand une formation sédimentaire est altérée sur toute sa hauteur, elle devient méconnaissable. C'est ainsi que le Continental terminal, en maintes régions d'Afrique, a été pris pour un sidérolitique remanié, alors qu'on a pu montrer qu'il s'agissait de couches sédimentaires marines, intensément transformées sur place par les altérations et la Pédogenèse. Si l'on veut bien ne pas généraliser abusivement, un raisonnement nouveau est à notre disposition.

Enfin, j'évoquerai la semelle des grandes transgressions sédimentaires. Il est très fréquent que ces transgressions anciennes s'avancent sur d'immenses surfaces aplanies et, parfois, sans formations détritiques significatives à leur base. Il est clair que plusieurs origines peuvent expliquer de telles semelles aplanies sur de vastes espaces : origine glaciaire, surfaces structurales exondées, vastes complexes deltaïques, bassins d'accumulation continentaux, etc. Mais une nouvelle manière de voir nous est offerte, si nous pouvons montrer que certaines de ces semelles des transgressions sont le résultat d'aplanissements de type météorique et pédologique.

Conclusion

D'autres résonances seraient à entendre. Vous avez contribué et vous contribuez, dans les Sciences de la Terre, à éclairer les chapitres que j'ai évoqués : Altération, Sédimentation, Hydrochimie, Systèmes de transformation, Diagenèse, Métallogénie, Géomorphologie, Paléoclimatologie, Géologie historique, et cette liste pourrait se bigarrer. Cette contribution vient tout simplement de ce que vous avez « la garde » du pôle superficiel du cycle géochimique et que, si vous le comprenez mieux, vous nous éclairez.

Je vous en remercie au nom des Sciences de la Terre, où j'ai eu quelque responsabilité pendant 15 ans. Et c'est la raison pour laquelle les Sciences de la Terre, tout en se réjouissant de votre position frontière entre Géologie et Biologie, vous ont fermement reconnus et aidés.

Je remercie aussi M. Georges AUBERT qui fut votre chef pendant plusieurs décennies. Au cours de cette période, j'ai vu opérer cet homme infatigable. Et j'ai deux petites choses à ajouter sur son cas.

La première est que tout ce que cet homme a appris et trouvé, il l'a toujours distribué aux autres. Il n'a rien gardé pour lui. Nous lui avons souvent dit que nous regrettions qu'il ne rédige pas tel ouvrage d'ensemble que nous souhaitions. En effet, dans sa passion de voir, d'expliquer, de témoigner dans les réunions et congrès, de soigner la famille croissante qu'il dirigeait, il restait peu de temps pour le labeur bénédictin. Mais, par les tournées, par l'enseignement, par son prodigieux courrier nocturne, tout ce qu'il savait, il l'a donné. Et ce n'est pas rien.

Le deuxième trait est aussi précieux. Il était normal qu'au départ, le pédologue mis au travail disposât d'un code, d'un langage. C'est la classification AUBERT et DUCHAUFOUR, améliorée, au fil des ans, par votre contribution. C'était indispensable. En effet, on discute depuis des siècles sur le fonctionnement des sociétés : le rôle démocratique de la base, avec ses assemblées et ses majorités ; le rôle exigeant des responsables, élus pour un temps. Et de l'équilibre de ces deux pouvoirs, dépendent l'équité et l'efficacité. Mais ce qui est trop souvent oublié, dans le tiraillement des originalités, c'est qu'aucune société ne peut vivre sans le secours de « contrats provisoires respectés de tous ».

Telle fut cette classification : votre « *contrat social* ».

Mais, dans le même temps où Georges AUBERT veillait, comme on l'a dit, sur ce contrat et en maintenait le respect, il respectait l'avenir et chacun de vous. Il a facilité et accepté, au fur et à mesure, avec une ouverture critique mais patiente dont j'ai été le témoin, tous les travaux analytiques et génétiques qui se préparaient à changer le contrat, ce qui se fit et se fait peu à peu. Convaincu de la nécessité de ces entreprises nouvelles, convaincu du respect nécessaire du code provisoire, Georges AUBERT a vécu sans discours cet équilibre entre ouverture et cohérence. Ce n'est pas facile et ce fut fait.

Tels sont les deux traits que je souligne à titre de cousin et de témoin, amical et reconnaissant. *J'ai dit.*

Georges AUBERT et son rôle international

R. TAVERNIER

Lorsque le Professeur LENEUF, Président du Comité Technique de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. m'a demandé de prendre la parole lors de la journée pédologique en hommage à Georges AUBERT, j'ai tout de suite répondu favorablement à cette demande et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord pour m'acquitter d'une dette de reconnaissance que je dois à Georges AUBERT qui m'a toujours très généreusement laissé profiter de sa longue expérience et de sa vaste connaissance des sols de tous les continents. Ensuite pour la très haute estime que j'ai pour la contribution de Georges AUBERT à l'essor de la Pédologie internationale et enfin, last but not least, pour cause des rapports amicaux que nous entretenons depuis de très nombreuses années.

Toutefois, à la réflexion je me suis rendu compte de mon étourderie. En effet, l'influence et l'impact international de l'œuvre de Georges AUBERT sont tellement vastes et variés que je crois qu'il faudrait une pléthore de pédologues expérimentés pour en faire la synthèse. J'ai donc inconsciemment accepté une tâche qui est au-dessus de mes forces. Je n'ai d'ailleurs aucun mérite particulier, sauf éventuellement le privilège de l'âge, pour prendre la parole à cette manifestation.

Il faudra donc qu'en l'occurrence je me limite à mentionner ici les quelques aspects de l'œuvre internationale de Georges AUBERT dont j'ai eu connaissance, tout en me rendant compte que je serai fort incomplet.

Je dois avant tout commencer par avouer que je ne parviens pas à me rappeler exactement quand j'ai rencontré pour la première fois le héros de cette journée. Chose d'ailleurs très étonnante, parce que

normalement Georges AUBERT, de par sa forte personnalité et ses judicieuses interventions lors de discussions, est rarement passé inaperçu.

D'ailleurs dès le début de sa carrière Georges AUBERT s'est fait remarquer. Ainsi en 1938, le regretté Dr Ch. E. KELLOGG, qui participait à Rome à la création de la Commission Internationale d'Agriculture, précurseur d'ailleurs de l'actuelle F.A.O., visitait également l'I.N.R.A. à Versailles. Comme la plupart d'entre nous le savent, le Dr KELLOGG prenait toujours de nombreuses photos et notes (dans un petit carnet, tout comme Georges d'ailleurs), mais à la différence de Georges AUBERT et de moi-même, il les éditait immédiatement après son retour, dans ce qu'il appelait « My travel journals ». En automne 1950, le Dr KELLOGG parcourait avec moi le journal de son voyage en Europe en 1938 et me montrait une photo du Professeur A. DEMOLON, flanqué de ses assistants, S. HÉNIN et G. AUBERT, devant la porte du laboratoire des Sciences des Sols à Versailles. Au sujet de Georges AUBERT, KELLOGG avait noté alors « an enthusiastic and very capable young soil scientist; however, he is a bit shy but nevertheless he will become a great guy ». Plus de 40 ans ont passé depuis lors, et on peut affirmer que, en ce qui concerne la carrière de Georges AUBERT comme pédologue, le jugement de Ch. E. KELLOGG s'est pleinement justifié. Je suis toutefois un peu moins sûr que son jugement au sujet de sa nature « un peu timide » s'est avéré exact. Peut-être KELLOGG s'est-il trompé à ce moment, ou peut-être aussi le caractère de Georges AUBERT a-t-il évolué au cours des années ?

Passons maintenant en revue la contribution de

Georges AUBERT à la Société Internationale de la Science du Sol. Comme vous le savez, cette Association avait déjà tenu des Congrès Internationaux aux États-Unis, en U.R.S.S. et au Royaume-Uni quand la seconde guerre mondiale a mis un terme à ses activités. Après la guerre, un certain nombre de pédologues ont essayé de recréer cette organisation internationale. C'est en effet suite à une initiative française, en l'occurrence l'organisation de la Conférence Internationale de la Science du Sol à Montpellier et à Alger en 1947, que pour la première fois depuis la seconde guerre mondiale, une réunion internationale de pédologues a eu lieu. Georges AUBERT, probablement encore un peu timide à cette époque, a néanmoins été une des chevilles ouvrières de cette conférence, particulièrement en ce qui concerne l'organisation des excursions en France et surtout en Algérie. D'ailleurs, à ce moment il avait déjà largement contribué, non seulement à la connaissance de la genèse et des propriétés des sols bruns et bruns lessivés, mais s'était également lancé dans l'étude des sols à croûtes calcaires et surtout des sols salins de la vallée du Chelif en Algérie. Quoi qu'il en soit, c'est grâce à la Conférence de 1947, qui a permis de renouer les contacts internationaux, qu'il fut décidé à Paris de tenir le prochain Congrès International de la Science du Sol à Amsterdam en 1950 et c'est à l'occasion de ce Congrès que l'actuelle Société Internationale de la Science du Sol fut fondée ou plutôt reconstituée. D'ailleurs lors du Congrès à Amsterdam, en 1950, la participation de Georges AUBERT a été très importante, tant pour ses contributions sur les sols tropicaux et sur les sols salins, que pour le fait qu'il était déjà à ce moment le chef de file d'une tournée de jeunes pédologues français. En plus, lors du Congrès d'Amsterdam, Georges AUBERT avait été élu comme vice-président de la Commission V (Genèse, Classification et Cartographie des Sols) et comme membre du Comité pour l'Étude des Sols Méditerranéens. Entre-temps, ses activités à l'O.R.S.O.M. (depuis lors devenu l'O.R.S.T.O.M.) l'avaient déjà amené à s'occuper des sols tropicaux et à élaborer un premier système de classification. Pour cette raison d'ailleurs, il fut invité à tenir une conférence générale sur les sols ferrallitiques lors du Ve Congrès International des Sciences du Sol, tenu en 1954 à Kinshasa (en ce temps là Léopoldville) en ce qui était alors le Congo belge. En plus, depuis 1950, il a pris une part très active aux activités de la Commission V de l'A.I.S.S. C'est en grande partie grâce à son initiative — particulièrement pendant le Congrès de l'A.I.S.S. en 1956 à Paris — que l'idée de faire une carte pédologique du monde est née. Il fut élu comme président de la Commission V lors du Congrès Pédologique International tenu à Madison en 1960. C'est sous sa

présidence que de nombreuses initiatives de coopération pédologique internationale ont été prises. Il y a lieu de mentionner en premier lieu le projet de l'élaboration d'une carte des Sols du Monde, qui grâce à la coopération de MM. L. BRAMAO et R. DUDAL (F.A.O.) et de V. KOVDA (U.N.E.S.C.O.) devenait opérationnel à partir de 1960. Pour l'élaboration de cette carte une légende, internationalement acceptée, a été mise au point. Lors du Congrès International de l'A.I.S.S. à Edmonton en 1978 toutes les feuilles de cette carte mondiale étaient imprimées. C'est également sous sa présidence qu'une Commission Internationale fut créée pour la préparation d'un système international de nomenclature des horizons des sols. En plus, G. AUBERT a toujours été un membre très actif de la sous-commission de l'A.I.S.S. pour l'étude des sols salins. Entre-temps, suite à l'organisation des cours de pédologie, dans le cadre des activités de l'O.R.S.T.O.M., les conceptions pédologiques d'AUBERT ont eu une répercussion de plus en plus internationale. A ce sujet, je puis mentionner qu'en 1952 trois pédologues belges du Centre de Cartographie des Sols, P. PAHAUT, R. DUDAL et G. HENRARD, ont suivi les cours pratiques de cartographie dans l'Anjou et je puis vous dire, mon cher Georges, qu'ils en ont gardé toujours le meilleur souvenir.

Vers la même époque, l'idée d'élaborer un système mondial de Classification des Sols, idée qui d'ailleurs avait déjà été lancée antérieurement par divers éminents pédologues, avait été reprise e.a. sous l'impulsion de Ch. E. KELLOGG. Le Dr Guy Smith, l'auteur principal de la Soil Taxonomy qui regrette infiniment de ne pouvoir, pour des raisons de santé, assister à cette manifestation, faisait en 1953 une tournée en Europe pour étudier les divers systèmes de classification utilisés sur le vieux continent. Georges AUBERT a alors organisé une excursion pédologique dans le bassin de Paris pour montrer une séquence d'évolution des sols de Rendzine, Sols bruns, Sols (bruns) lessivés, Sols podzoliques et Podzols. Je me rappelle encore très vivement l'apparition de Georges AUBERT sur le terrain. Il était équipé d'une culotte de cavalier et sautait infatigablement, avec sa vivacité coutumière, d'un profil à l'autre sans un moment de répit. On avait l'impression qu'il était prêt à enjammer un fougueux destrier pour galoper par monts et par vaux à la recherche des profils. Je me rappelle qu'à cette occasion le Dr Guy SMITH, toujours imperturbable qui regardait avec étonnement cette débordante activité me demandait : « Is it really necessary to be in such a hurry to look at soil profiles ? ». Depuis lors Georges AUBERT a assisté à toutes les réunions qui se sont tenues en Europe pour discuter des diverses approximations de la « Soil Taxonomy ». De

très nombreuses suggestions de Georges AUBERT ont été incorporées dans « Soil Taxonomy ». Citons à ce sujet « Le taux de lessivage » 1/1,2 dans la définition de l'horizon argilique, « La définition du sol brun acide (Dystrochrept) », etc. Il est vrai que Georges AUBERT n'a jamais été un adepte fervent de la Soil Taxonomy, mais il me semble qu'il est opportun de souligner ici sa contribution très importante, peut-être involontaire, à l'élaboration de ce système de classification du « Soil Conservation Service » de l'U.S.D.A.

C'est cependant sa contribution à la connaissance des sols tropicaux qui, à mon avis, constitue l'œuvre la plus importante de Georges AUBERT. C'est d'ailleurs lui qui a introduit le concept des sols ferrugineux tropicaux. En outre, il a été un des membres les plus actifs des diverses Conférences Interafricaines des Sols, organisées dans le Cadre de la C.C.T.A. La légende de la Carte des Sols de l'Afrique éditée en 1962 par cet organisme, est basée essentiellement sur le système de classification élaboré par Georges AUBERT et ses collaborateurs.

Une activité internationale de G. AUBERT, qui est peut-être moins connue parce qu'il est mondialement connu comme un spécialiste des sols tropicaux, est sa participation à l'élaboration de la légende de la Carte des Sols de l'Europe de la F.A.O. à l'échelle du 1:2 500 000. Il a participé, à partir de 1950, comme membre de la délégation française (avec e.a. S. HÉNIN et P. DUCHAUFOUR) à plusieurs réunions et la plupart de ses opinions concernant la classification, e.a. concernant les sols bruns et les sols bruns lessivés, ont été intégrées dans la légende de cette carte.

D'après l'état civil, Georges AUBERT a actuellement 66 ans. C'est évidemment une erreur. En effet, il n'a que 2 fois 33 ans. Le Professeur J. BOULAIN, dans son remarquable exposé sur les « Concepts, approche pédologique globale » dans « l'École O.R.S.T.O.M. », a cru reconnaître, à juste titre, trois périodes dans l'œuvre scientifique de Georges AUBERT. A mon avis les deux premières périodes correspondent chaque fois à des périodes

de 33 ans de la vie de Georges AUBERT. Les deux premières périodes (incubation et expansion) sont, à mon avis, actuellement achevées. Il reste la troisième période, qui, je l'espère, durera également 33 ans et qui sera une période de réflexion. Nous espérons en effet que durant les 33 ans à venir, Georges AUBERT trouve le temps nécessaire pour éditer les très nombreuses notes inscrites dans les petits calepins, qu'il a prises durant ses innombrables excursions dans pratiquement tous les pays du monde. Une synthèse de son expérience sera une des plus grandes contributions à la connaissance des sols du monde entier. J'espère que cette troisième période de 33 ans dans la vie de Georges AUBERT sera aussi fructueuse que celles des deux périodes précédentes.

Georges AUBERT n'est pas seulement un grand pédologue, mais il a été un remarquable professeur qui savait enthousiasmer ses élèves. Dans tous les pays du monde, on rencontre ses anciens élèves qui ont été orientés par lui vers la Science Pédologique et qui sont fiers de l'avoir eu comme maître.

Rendons à Georges AUBERT la justice et l'hommage qu'il mérite. Dès le début de sa carrière il a abordé des recherches dans un domaine particulièrement difficile, notamment l'étude des sols des régions tropicales et sub-tropicales. A ce moment, il n'existait que quelques vagues descriptions de profils et un certain nombre d'études, surtout descriptives, et on ne disposait pas des ressources que l'on possède aujourd'hui. Nous croirions manquer à la reconnaissance qu'on lui doit, si nous ne disions pas ici publiquement que son œuvre, malgré peut-être certaines imperfections, a été d'un très grand secours pour tous les pédologues actuels. Le premier qui essaie de déchiffrer les sols de territoires inconnus est comme celui qui explore le premier une forêt vierge; il ouvre le passage et facilite l'accès de ceux qui viennent ensuite. Si l'on prend la définition de la forêt vierge équatoriale d'après *La forêt aux Cancres*, c'est une forêt où la main de l'homme n'a jamais mis le pied. Georges AUBERT n'a certainement pas défriché cette forêt, mais il l'a parcourue à pied et nous a initiés à l'étude de ses sols.

Georges AUBERT - savant et ami

Victor A. KOVDA

*Membre correspondant de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.
Membre étranger de l'Académie d'Agriculture de France*

J'ai fait la connaissance de Georges AUBERT à Paris, en 1956, lors des travaux du VI^e Congrès International des Pédologues. C'est alors que, dans nos conversations communes avec le Professeur TAYLOR, et dans nos interventions aux réunions de la V^e Commission nous avons avancé l'idée de dresser la carte mondiale des sols et d'élaborer une nomenclature coordonnée des sols.

En automne 1958, j'ai été nommé Directeur du Département des Sciences Naturelles et Exactes de l'U.N.E.S.C.O. A cette époque, on déployait avec succès au sein de l'U.N.E.S.C.O., le grand projet international dit « La zone aride ». Le Professeur AUBERT était l'un des plus actifs participants au Conseil Consultatif de ce projet, et l'expert permanent de l'U.N.E.S.C.O. dans les domaines de l'aridité du sol, de sa couverture végétale et de l'agriculture irriguée. Les réunions des groupes d'experts et des cours d'études du projet « Zone aride » se sont tenues dans des pays différents, ce qui nous a donné, au Professeur AUBERT et à moi-même, la possibilité d'étudier sur le terrain les problèmes de l'aridité de l'Iran, de l'Égypte, de la Tunisie, de l'Espagne. Quand nous étions en Tunisie, nous avons suggéré au gouvernement de ce pays d'organiser sous l'égide de l'O.N.U., une expérimentation précise et très poussée sur l'utilisation des eaux plus ou moins salées (il n'y a pas d'eau douce pour l'irrigation en Tunisie) pour irriguer les sols des zones arides, eux-mêmes déjà plus ou moins salés.

Plus tard, dans le cadre de ce projet, les spécialistes français et tunisiens, ou d'autres pays (Pays-Bas

et Italie), ont réalisé avec succès l'utilisation des eaux saumâtres pour l'irrigation, moyennant un drainage intensif et efficace, et des arrosages fréquents pour provoquer un entraînement des sels. Les résultats de ces travaux sont maintenant connus à travers le monde; ils sont d'une très grande importance. Mais le programme de l'U.N.E.S.C.O. s'élargissait. Les problèmes de la pédologie tropicale prenaient une importance toujours plus grande. Le « Conseil Consultatif des Tropiques Humides » de l'U.N.E.S.C.O. tenait ses séances de travail en Inde, sur les îles Hawaii, en République de Côte d'Ivoire, au Ghana, au Kenya. Les connaissances étendues du Professeur AUBERT dans ce domaine étaient irremplaçables.

Je me rappelle surtout les discussions amicales au Ministère de l'Agriculture et à l'Ambassade de France à Abidjan, sur les destins et les voies du développement social des pays indépendants de l'Afrique tropicale. J'ai demandé à Georges AUBERT de me montrer sur place, des exemples typiques de la formation des « latérites », des cuirasses, des sols ferrallitiques. En République de Côte d'Ivoire et au Ghana, nous avons suivi des itinéraires particuliers. L'étendue des connaissances du Professeur AUBERT et sa capacité de reconnaissances dans la grande variété de sols ferrallitiques étaient surprenants. Tout cela nous a amené à l'idée de rédiger et de faire publier par l'U.N.E.S.C.O. une monographie sur les « latérites », ce qui a été réalisé par le docteur MAIGNIEN, ancien élève et très proche collaborateur du Professeur AUBERT. Ce problème a été spéciale-

ment traité par la conférence de l'U.N.E.S.C.O. à Madagascar.

En 1960, le VII^e Congrès International de Science du Sol, à Madison (U.S.A.), a adopté la résolution d'élaborer une nomenclature coordonnée des sols et de dresser la carte mondiale des sols sur la base de la généralisation des innombrables données, recueillies dans les différents pays. L'U.N.E.S.C.O. et la F.A.O. ont associé ce problème à leurs programmes, sur la demande de la Société Internationale de la Science du Sol. Le Professeur AUBERT fut l'un des plus actifs défenseurs de ce projet et choisi comme membre du Comité Consultatif International de la Carte des Sols du Monde. La première séance du Comité s'est tenue à Rome en été 1961, à la F.A.O. Le Comité Consultatif s'est toujours efforcé de coordonner les points de vue, quant au choix des meilleures définitions et des meilleurs termes pour désigner les diverses unités cartographiques de sols en fonction de leur représentation géographique.

Le Professeur AUBERT a beaucoup contribué à cet effort de coopération internationale durant vingt années d'activité de toute une génération de pédologues. Il en est résulté la carte, légende et textes édités par l'U.N.E.S.C.O. et la F.A.O., dont l'importance est si grande pour tous les pédologues, sur un plan international. Quelle que soit la valeur de ces cartes et de leurs légendes, les collections des principaux types de sols sont encore plus utiles. De nos discussions communes et avec le Professeur VAN BAREN est née l'idée de fonder un Musée international des sols du Monde. Soutenue par l'U.N.E.S.C.O., la Hollande a pris en charge la création d'un tel musée. Le programme et les fonctions du Musée, florissant actuellement à Wageningen, ont été mis au point par un petit groupe d'experts. Le Professeur AUBERT reste toujours membre de ce groupe de conseillers du Musée, et le fait bénéficier de ses connaissances et de ses idées.

En 1966, après des années passées à l'U.N.E.S.C.O., j'ai pris les fonctions de secrétaire scientifique du Comité Scientifique et Technique auprès du C.E.S. (1) (Nations Unies). Les pays en voie de développement demandaient l'assistance scientifique active des pays développés dès ce moment et pour préparer leur avenir. J'ai alors fait demander au Professeur AUBERT d'établir une revue générale des ressources naturelles, climat, flore, faune, sols et conditions

écologiques naturelles générales des pays en voie de développement, d'Afrique, Asie et Amérique du Sud.

Les principes généraux de l'utilisation et de la conservation des ressources des pays en voie de développement ont ainsi pu être formulés et après une étude critique par les divers États membres de l'O.N.U., à la fin des années 60, cette étude a pu être publiée par le Secrétariat de cette organisation mondiale.

Les chercheurs pédologues abordent alors, à travers le Monde deux programmes d'études parmi les plus importants : Le Programme Biologique International puis le Programme « l'Homme et la Biosphère » (M.A.B.). Les années 70 sont marquées par l'aspiration générale de tous à résoudre les problèmes si complexes, tels que satisfaire les besoins grandissants de l'humanité, surtout dans les pays en voie de développement, et protéger en même temps la biosphère et notre environnement. L'aridité, la désertification, la salure et l'érosion des sols, la déflation, l'emprise des terres sont les phénomènes très alarmants de la dégradation, si souvent irréversible, du sol et de la désorganisation du cycle biogéochimique des éléments.

Le Professeur AUBERT participe à la discussion de ces problèmes aux sessions du X^e Congrès International de Science du Sol en U.R.S.S. (1974), aux conférences de l'U.N.E.P. au Kenya, aux séminaires internationaux de l'U.N.E.P. et de l'U.R.S.S. dans les Républiques de l'Asie Centrale et du Caucase (1978, 1979, 1980). Il est plein d'enthousiasme et d'entrain créateurs. Au cours de ces années, il visite souvent l'U.R.S.S. Nous faisons ensemble des tournées sur le terrain pour étudier les Sierozems de Turkménie qui sont les meilleurs sols sur loess de l'Asie Centrale, ou sur le plateau d'Arménie les Chernozems de montagnes. A ces séminaires internationaux, il fait des exposés sur les sols des parcours arides et sur les sols salés d'Afrique. A Bakou et à Erevan, il étudie et apprécie avec moi les rapports de jeunes chercheurs d'Afrique et d'Asie, participant à ces cours.

Vingt-cinq ans de notre amitié ont passé. Nous nous préparons à l'étude des problèmes de la Pédologie, encore irrésolus. Mais tous les amis du Professeur AUBERT peuvent être fiers de ses travaux précédents.

(1) C.E.S. : Conseil économique et social (O.N.U.).

Les sols sub-arides au sud du Sahara

Roger FAUCK

Pédologue.O.R.S.T.O.M., 24, rue Bayard, 75008 Paris

Il ne peut être question de présenter les résultats scientifiques les plus récents obtenus dans cette région mais plutôt d'essayer de faire le point, globalement, sur l'état des connaissances concernant les sols des régions subarides situées au sud du Sahara. Un historique préalable succinct s'impose pour expliquer la situation présente.

G. AUBERT a commencé ses recherches pédologiques en Afrique Occidentale en 1945 et tout de suite il s'est efforcé non seulement d'établir l'inventaire de sols qui n'étaient pas connus, mais de définir leurs potentialités agronomiques. A cette époque, le Pr TAVERNIER l'a rappelé, il n'y avait pas de références bibliographiques sur la typologie des sols de l'Afrique sèche et il n'y avait que peu de données sur les potentialités culturales des sols cultivés. C'est la raison pour laquelle l'Office du Niger a été pour G. AUBERT un champ d'étude privilégié. Nous rappellerons, en particulier, que la première classification pédologique a été une classification en langue Bambara des sols de la cuvette centrale du Niger. G. AUBERT a cherché à se caler sur les rares stations de recherche agronomique pour trouver une liaison entre la typologie des sols et leurs aptitudes culturales. Par la suite, dans le cadre de ses fonctions à l'O.R.S.T.O.M., il a animé de longues tournées annuelles de prospections pédologiques dans d'autres régions du Sahel et l'accumulation de ses notes (prises sur de petits carnets) a un peu constitué la première banque de données des sols et surtout la base de ses enseignements en France.

G. AUBERT a orienté très vite l'O.R.S.T.O.M. vers des travaux de cartographie à petite échelle, seule solution réalisable compte tenu de l'étendue des

régions sahéliennes à prospector. Toujours préoccupé des problèmes de développement il a également commencé à mettre l'accent sur la réalité et la rapidité de l'évolution des sols sous les climats intertropicaux, même ceux à climat semi-aride. Dans ces conditions, les équipes dirigées par G. AUBERT ont accumulé peu à peu les connaissances sur les sols et leurs potentialités. Cependant, avec prudence car il s'agit d'un schéma, on peut dire que le déroulement des activités de l'O.R.S.T.O.M. présente trois étapes successives.

1^{re} étape : les données de base

Il s'agit de l'inventaire des sols et de leur cartographie à petite et moyenne échelle. Actuellement, cet inventaire peut être considéré comme pratiquement terminé, car la couverture cartographique existe à 500.000^e ou à 1.000.000^e pour tout le Sahel sauf le Mali et une partie de la Mauritanie. Certains pays comme le Tchad ont une couverture complète des zones agricoles à 200.000^e. Bien que ce bilan soit très positif, on doit quand même noter deux insuffisances. En premier lieu, trop de travaux ont été réalisés à petite échelle. S'il n'était pas possible de faire autrement, cela a peut-être freiné les progrès des connaissances en faisant penser qu'en climat semi-aride la contrainte climatique était le facteur essentiel de la pédogenèse. G. AUBERT a d'ailleurs insisté sur la zonalité des processus conduisant à une homogénéité apparente des sols. Actuellement, on s'aperçoit que la variété des types de sols est très grande. En second lieu, les conditions difficiles de la prospection dans les années 50 ont conduit G. AUBERT à effectuer toutes ses tournées en saison sèche et ses

interprétations sur les processus de formation des sols, sur le plan des relations avec la géomorphologie en particulier, ont peut-être été faussées, du moins est-ce l'avis de l'auteur.

2^e étape : les mécanismes

Afin de faciliter la cartographie dans des milieux difficiles, les pédologues ont cherché à comprendre les lois de la répartition des sols sur le terrain ce qui les a conduits à tenter d'expliquer leur genèse. Je ne cite pas les nombreux travaux qui ont été publiés dans le cadre de thèses ou de synthèses. Le point qui semble le plus important a été le changement d'échelle d'étude des sols auquel ont été amenés les chercheurs. Le Pr MILLOT a par ailleurs fait le point des très nombreux résultats accumulés et de leur intérêt non seulement pour les pédologues mais également pour les géologues.

3^e étape : la dynamique actuelle

Actuellement, le sujet essentiel des recherches concerne la dynamique de l'eau et des particules dans et sur les sols. L'eau est en effet une contrainte primordiale du développement. Or, dans certains cas, la prise en considération des seules données météorologiques ne suffit pas pour définir les potentialités, car l'aridité édaphique est plus sévère du fait du phénomène de croûtage superficiel des sols. Elle se traduit par une diminution de l'infiltration, une diminution des réserves en eau et également une augmentation du ruissellement. Par voie de conséquence, ce dernier induit des phénomènes d'érosion graves malgré le modelé peu accentué des glacis des régions sub-arides. Compte tenu de la grande variabilité des pluies dans le temps et dans l'espace, les pédologues utilisent de plus en plus des techniques élaborées, simulateurs de pluies, infiltromètres, tout en continuant les recherches sur les données de base et les mécanismes.

Ce rappel historique fait, il faut maintenant prévoir l'avenir de la recherche pédologique. Indépendamment de la réponse à donner à des demandes émanant de gouvernements locaux ou de partenaires variés, il est opportun de profiter d'un rassemblement occasionnel de pédologues autour de G. AUBERT pour essayer de discerner la prochaine étape des recherches pédologiques. Personnellement, pour faciliter les débats, compte tenu des résultats accumulés par l'O.R.S.T.O.M., compte tenu également des conclusions auxquelles ont abouti les travaux des nombreuses réunions internationales qui se sont tenues partout dans le monde sur les problèmes du Sahel, j'identifie les 3 domaines prioritaires suivants :

(1) LES CARTES THÉMATIQUES. Les cartes dites d'aptitude ou de contrainte, ou de ressources en sols, ne sont pas assez nombreuses et leurs légendes ne sont pas toujours satisfaisantes. Des essais concluants

existent (bassin du lac Tchad, ressources en sols de Haute-Volta), et le problème semble plus facile à résoudre en milieu semi-aride qu'en France, comme l'a exposé le Pr HÉNIN. Mais un certain nombre de données manquent, car on ne connaît pas encore très bien les besoins réels des plantes cultivées en ce qui concerne la morphologie et la différenciation des sols. Il s'agit des exigences édaphiques, c'est-à-dire des caractéristiques des profils qui ont une importance pour le bon développement de l'enracinement et pour la production végétale. On parle toujours des aptitudes des sols pour la production végétale, mais rarement des besoins spécifiques des plantes en ce qui concerne le « support sol » pour leur enracinement.

(2) LA CLASSIFICATION. Les progrès récents sur la genèse des sols n'ont pas été pris en compte dans la classification. En particulier de nombreux pédologues sont insatisfaits du rôle donné à la notion d'iso-humisme.

(3) CARACTÉRISTIQUES HYDRO-DYNAMIQUES. Quels que soient les types de sols et leur place dans les classifications, on s'aperçoit que dans les régions où le facteur eau est essentiel, les caractéristiques hydro-dynamiques sont déterminées essentiellement par la structure des quelques centimètres de la partie supérieure des profils. Le compactage, le croûtage, avec diminution de la porosité et de l'infiltrabilité devraient être étudiés tant sur le terrain qu'au laboratoire. Un colloque récent qui s'est tenu à Montpellier (O.R.S.T.O.M. C.E.P.E./C.N.R.S.) a été consacré aux recherches intégrées sur l'interface sol-eau-plante. Tous les chercheurs, quelle que soit leur spécialisation, ont insisté sur la nécessité de mieux comprendre le mécanisme de la compaction et de l'évolution de l'horizon supérieur si l'on veut déterminer des méthodes rationnelles de gestion des sols. Ils ont noté que la différenciation en horizons est un point relativement secondaire pour l'utilisation, d'autant plus que cette différenciation est souvent considérée comme héritée ou du moins ne semble pas toujours être en phase avec la dynamique actuelle des sols.

Après avoir identifié très schématiquement quelques lacunes, ma conclusion sera de demander à G. AUBERT de bien vouloir animer le débat sur les priorités de la recherche pédologique dans les régions semi-arides d'Afrique, en tenant compte de ce que l'O.R.S.T.O.M. doit prévoir, suffisamment à l'avance, les orientations futures de la recherche. Les priorités doivent tenir compte des besoins du développement des pays semi-arides, mais il est bien entendu que les progrès dans les connaissances sur le plan fondamental, sont souvent un préalable au bon développement et à l'efficacité des recherches appliquées.

interventions des participants

J. MARÇAIS : Instruit par une longue expérience en cartographie géologique, je voudrais insister sur la nécessité :

1. d'établir des normes assez souples pour qu'elles soient utilisables par tous;
2. d'établir plusieurs cartes thématiques de façon à faire ressortir le thème de base que l'on veut mettre en évidence. En particulier, tâcher de différencier ce qui est état actuel de ce qui est genèse d'un sol;
3. enfin, peut-être, d'établir des cartes volontairement simples sur des substrats qui permettent de les superposer pour mettre en évidence les rapports des faits entre eux.

A. RUELLAN : Parmi les objectifs futurs de la Pédologie, il faut aussi citer la cartographie des sols.

On a beaucoup cartographié en fonction des connaissances que l'on avait. Ce fut plus une cartographie des types de sols, des profils verticaux, qu'une représentation de ce qui est réellement la couverture pédologique.

Cette cartographie-inventaire a permis la mise en route des études détaillées et des études dynamiques.

Aujourd'hui, les résultats de ces études détaillées et dynamiques permettent de concevoir autrement la représentation cartographique des sols, de la rendre plus proche de la réalité donc plus utilisable. Des recherches ont été entreprises récemment à ce sujet; je pense en particulier aux travaux et aux résultats déjà obtenus, de BOULET, FRITSCH, HUMBEL en Guyane; mais aussi aux travaux entrepris ailleurs plus particulièrement en Côte d'Ivoire, dans le sud de la France, en Bretagne, etc. Il me paraît très urgent que ces recherches sur la représentation cartographique soient amplifiées.

G. AUBERT : Malgré les différences que présentent les deux zones arides ou semi-arides situées au nord et au sud du Sahara, en particulier du fait de la chute des pluies en période fraîche dans un cas, ou en période chaude dans l'autre, l'aménagement des terres ne peut y être dans l'une et l'autre région, qu'un système agro-sylvo-pastoral intégré fondé sur l'étude détaillée, suivant un mode multidisciplinaire, du milieu total.

De nombreux problèmes restent à approfondir sur le plan pédologique, comme l'a souligné R. FAUCK pour les régions sub-sahariennes et des recherches doivent être développées principalement, me semble-t-il, sur les points suivants :

— les exigences édaphiques des principales cultures utilisées dans ces régions Sahéliennes et Sahélo-soudanaises et leurs réactions aux caractéristiques des sols; étude qui ne peut être réalisée qu'en collaboration avec agronomes et physiologistes;

— la circulation de l'eau dans ces sols, et sa disponibilité pour la végétation ainsi que l'influence de celle-ci et de la mésofaune sur cette dynamique; comme il a été montré par E. ROOSE cette mésofaune peut y jouer un rôle important;

— l'érodibilité des différents types de sols et l'influence sur ce caractère des matières organiques qu'ils contiennent.

Toute mise en valeur ne peut être fondée que sur une étude précise des sols et de leur répartition. Leur cartographie pédologique comme celle de leurs aptitudes et de leurs contraintes culturelles restent plus que jamais indispensables.

Une classification de ces sols est nécessaire comme base de cette opération.

Dans les sols que nous envisageons ici, beaucoup d'entre eux sont réunis dans la classe des Sols Isohumiques qui présente certaines difficultés quant à sa définition et à ses limites, comme il vient d'être signalé.

Elles sont particulièrement importantes quand il s'agit justement des Sierozems et des Sols bruns subarides. En effet, s'il paraît possible de fonder la définition d'une classe de sols sur la répartition et la constitution de la matière organique lorsqu'elle est abondante dans le sol, cela est certainement moins efficace lorsqu'elle est en très faible quantité comme dans les sols indiqués ci-dessus.

Il a été également montré, en particulier par A. RUELLAN, que la répartition « isohumique » de la matière organique dans certains de ces sols est largement due à l'action de l'homme, au défrichement et à la mise en culture.

Enfin, comme il a encore été démontré récemment par M. POUGET, si tous les sols isohumiques présentent une teneur relativement élevée en acides humiques gris dans l'ensemble des acides humiques, par contre certains d'entre eux, tels les Sierozems calcaires des sols des hauts plateaux du sud-algérois, sont nettement plus riches en acides fulviques — fixés par l'excès de Calcium — qu'en acides humiques, contrairement à ce que l'on observe dans les sols isohumiques « Classiques » tels Chernozems, Sols Châtains, Brunizems.

Devant ces remarques, certains ont pensé à remplacer cette classe par une « classe des sols à profil calcaire différencié ». Là aussi bien des problèmes se poseraient pour différencier des processus souvent d'âges très différents. Ne serait-on pas également tenté d'y inclure les Sols Bruns Lessivés sur lœss ou les Sols Fersiallitiques sur calcaire dur ?

En fait ne peut-on estimer actuellement que nous avons été un peu trop loin dans la définition d'une classe trop large de Sols Isohumiques ? D'ailleurs même dans la classification des sols utilisés en U.R.S.S., les Sierozems sont séparés des Sols Châtains et des Chernozems au plus haut niveau. Quant aux Sols Bruns subarides, nous avons été parmi les premiers à les identifier.

En définissant les Sols Isohumiques comme actuellement, mais en insistant sur une limite minimale de teneur en matière organique à une certaine profondeur et en maintenant strictement le type de construction de la matière organique dans les 30 premiers centimètres ($C. \text{ Humique} > C. \text{ Fulvique}$) on limitera cette classe mais n'aura-t-elle pas une meilleure signification écologique ?

Peut-être certains Sierozems calcaires devront-ils être rapprochés des Sols Calci-magnésiques et certains Sols Bruns Subarides des Sols peu évolués.

Cette question mérite d'être reprise.

Derniers développements de la recherche sur les sols salés

Claude CHEVERRY

Maître de Conférences (Sciences du sol) E.N.S.A., 65, rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes

Introduction

L'intérêt particulier que G. AUBERT a toujours porté aux sols salés et à leur mise en valeur remonte à 1937. C'est en effet l'année où, quittant Versailles, il s'est trouvé confronté au problème concret de la salinisation progressive des sols de la plaine du Chélif, en Algérie : tâche passionnante, dont il devait ensuite passer le relais à BOULAIN. Depuis lors, G. AUBERT joue un grand rôle dans la conception et l'animation des recherches en ce domaine à travers le monde, avec ses amis KOVDA, RICHARDS, SZABOLCS, LAUDELOUT, pour n'en citer que quelques-uns.

Cet intérêt s'est également ressenti dans son enseignement, et ce n'est pas une coïncidence si beaucoup de ses élèves, de nationalités très diverses, ont ensuite axé leurs propres recherches dans cette direction. Je vais tenter de synthétiser ces travaux, en montrant comment ils ont contribué à ouvrir des voies d'avenir.

Cet avenir verra, me semble-t-il, une grande place accordée à la modélisation. Un pédologue placé devant un sol concerné par la salure ne peut pas en effet se contenter de décrire ce sol. Il lui faut aussi *prévoir comment* le remettre en valeur, ou comment l'empêcher de se saler davantage. Or « la diversité des situations, la rapidité des réponses souhaitées sont telles que seuls les modèles de simulation sur ordinateur pourront prétendre dans l'avenir fournir ces prévisions à un coût minimal » (DUFÉY *et al.* 1979). Trois questions paraissent alors préoccupantes :

— l'eau d'irrigation utilisée percolera-t-elle à travers le sol considéré ?

— dissoudra-t-elle les sels cristallisés du sol au cours de son cheminement ?

— entraînera-t-elle des modifications de la composition du complexe adsorbant des colloïdes du sol, avec les conséquences qui peuvent en résulter sur le comportement physique de ce sol ?

On a là les trois ingrédients, ou « sous-modèles » d'un modèle de simulation :

— un modèle de transfert de l'eau et des solutés. Le mouvement des sels se fait en effet avec la solution du sol par convection, et à travers cette solution par diffusion ;

— un modèle géochimique rendant compte des phénomènes de précipitation, dissolution des sels ;

— un modèle relatif aux phénomènes d'échange sur les argiles.

Grâce à TARDY, FRITZ, DROUBI, DOSO pour l'approche géochimique, à LAUDELOUT, DUFÉY pour les échanges, on dispose désormais de « bonnes munitions ». Michel RIEU, qui contribue beaucoup lui-même à ces approches, détaillera ces points dans son intervention. Je me contenterai pour ma part d'insister sur un point clef : cette ambition de modéliser les phénomènes de salure dans les sols a déjà, et va encore plus dans l'avenir, « dynamiser » les recherches dans toute une série d'autres domaines touchant aux sols salés. Je vais essayer d'illustrer cette idée en montrant le « va-et-vient » que l'on peut envisager entre les modèles de simulation et cinq domaines de recherche, auxquels les anciens élèves de G. AUBERT, et lui-même en premier, ont fortement contribué ces dernières années. J'ai choisi de vous présenter ces cinq domaines dans l'ordre suivant : — les expérimentations de terrain à moyen

ou à long terme; — les mesures effectuées sur le terrain « in situ et en continu »; — les études globales de milieux salés particuliers; — les études de laboratoire; — les approches morphologiques et leurs applications à la classification et à la cartographie des sols.

1. LES EXPÉRIMENTATIONS DE TERRAIN A MOYEN OU A LONG TERME

Un exemple est célèbre dans ce domaine, et mérite de l'être : c'est le projet CRUESI, lancé en Tunisie par l'U.N.E.S.C.O., auquel OLLAT et COMBEAU, de l'O.R.S.T.O.M., ont largement contribué, aux côtés de leurs collègues tunisiens. On a pu suivre en cette occasion, de façon très méthodique et sur plusieurs années, l'évolution de la salure des sols et des rendements agricoles, dans divers terrains arrosés avec des eaux assez fortement minéralisées, de 2 à 7 g de sel par litre. En dehors du projet CRUESI, on peut citer la parcelle Ksar Rhilane, étudiée de 1952 à 1968, qui a permis d'observer les résultats de cultures de : fourrages (luzerne en particulier), céréales (orge, blé tendre), coton, cultures maraîchères (BALDY-J. - P. COINTEPAS).

Certes des essais de cette envergure, poursuivis maintenant par le C.R.G.R. tunisien, sont lourds, très coûteux et ils posent le même type de question que les essais de fertilisation de même durée. Mais ils constituent *l'instrument de calage rêvé pour tester la validité des modèles* de simulation et resteront en ce sens irremplaçables.

La Tunisie a d'ailleurs constitué un champ privilégié pour ce type d'expérimentation avec d'autres expérimentations de terrain, plus modestes dans leurs objectifs, mais très axées sur telle ou telle culture : je citerai les travaux de NOVIKOFF sur les palmeraies, d'HAMZA sur les oliveraies, de BELKHODJA sur l'oranger, de M^{me} FARAJ (alors M^{lle} LARGUÈCHE) sur les eucalyptus. On pourrait aussi évoquer l'Algérie (betteraves), le Maroc (expérimentations mises en place par RUELLAN).

2. LES MESURES « IN SITU » ET « EN CONTINU »

Le deuxième exemple de « va-et-vient » entre le modèle de simulation et un autre type d'activité de recherche, ce sont les mesures effectuées « in situ » dans les sols salés. Les américains ont relancé cette mode depuis une quinzaine d'années, en insistant sur les mesures de la résistance du sol. Ce furent d'abord les « salinity sensors » et, plus récemment, une méthode empruntée aux géophysiciens : on plante dans le sol quatre électrodes en ligne, selon la configuration dite de WENNER et on apprécie ainsi la

résistance qu'exerce une couche de sol d'épaisseur donnée au passage du courant électrique.

L'avenir paraît également aux mesures simultanées, *in situ* et en continu, du pH, de l'Eh, de la pression partielle de CO₂, et de la teneur de la solution du sol en tel ou tel ion (grâce à des électrodes spécifiques). Les sols salés sont souvent suffisamment humides, notamment lorsqu'une nappe est présente à faible profondeur, pour que les conditions de fonctionnement des électrodes soient correctes. Dans ce domaine, l'O.R.S.T.O.M. est en pointe, en particulier grâce aux travaux de LOYER et de SUSINI, en Tunisie et au Sénégal.

Les problèmes techniques posés par de tels dispositifs s'avèrent très délicats : impédance de circuit, étanchéité du système, maintien en état de toutes les électrodes... La garantie du succès est ici une étroite collaboration avec les électroniciens. Mais l'enjeu est de taille puisque ces dispositifs permettent une caractérisation instantanée précise de toute une série de paramètres; ils permettent également de suivre leur évolution saisonnière, et de tenter des bilans, pour le sodium par exemple (électrodes en place dans les réseaux de drainage).

L'intérêt pour la modélisation est évident : les modèles géochimiques actuels s'appuient fréquemment sur des données de pH, de Eh, de P_{CO2} arbitraires, ou mesurées dans d'autres milieux naturels. Ces mesures *in situ* et en continu constitueront des données d'entrée bien meilleures.

3. LES ÉTUDES GLOBALES DE CERTAINS MILIEUX SALÉS

Ces études prennent en compte des paysages salés *bien délimités géographiquement*, par exemple les mangroves de Casamance (VIEILLEFON), celles du Siné Saloun (MARIUS), les polders du lac Tchad (CHEVERRY), les plages de salure des plateaux algériens (POUGET). On applique au milieu choisi tout un faisceau de démarches différentes, depuis la morphologie jusqu'aux méthodes géochimiques fines (isotopes, géochimie organique...) en passant par la minéralogie des argiles et la physico-chimie traditionnelle. Ces études correspondent à un suivi dans le temps très régulier, sur plusieurs années consécutives : la notion de chronoséquence est souvent associée à celle de toposéquence.

C'est ici la patience, et l'aspect convergent de toutes les méthodes mises en œuvre, dont certaines très éloignées des préoccupations habituelles des spécialistes des sols salés, qui permettent d'arriver à un certain niveau de compréhension de la genèse et du fonctionnement actuel de ces paysages. A certaines phases de ces travaux de longue haleine,

l'intérêt agronomique peut ne pas paraître évident. On constate pourtant que les « retombées agronomiques » sont au bout du chemin très réelles. J'en prendrai un exemple récent, celui du Sénégal. A la suite de la sécheresse de ces dernières années, la riziculture de mangrove a considérablement diminué et le gouvernement a dû prendre des mesures d'urgence, et de grande ampleur. Si un pédologue O.R.S.T.O.M. comme MARIUS a pu jouer l'an dernier un rôle important dans la conception de ce plan d'urgence, c'est grâce aux études « globales » menées précédemment par VIEILLEFON et par lui-même.

4. LES ÉTUDES DE LABORATOIRE

Il faut d'abord rappeler un point concret : les déterminations analytiques effectuées sur des échantillons de sols salés restent, aujourd'hui encore, délicates. Apprécier la part respective du calcium, du magnésium et du sodium dits « échangeables » dans un sol simultanément salé, calcaire et gypseux constitue une entreprise périlleuse. Je souligne ici le travail discret mais considérable réalisé au laboratoire O.R.S.T.O.M. de Bondy par les équipes de DABIN et de PINTA, je pense notamment à PELLOUX, BRION, REGAZZI, FILLMANN, et d'autres, passant des journées à apprécier les interactions entre ions en spectrométrie, à trouver des astuces pour améliorer la détermination des bases échangeables et de la capacité d'échange. Je pense aussi, bien entendu, à tous les chimistes des laboratoires d'outre-mer, qui ont réussi à nous donner de bons résultats, dans des conditions difficiles.

J'ai choisi, pour rendre compte des développements récents des recherches en laboratoire sur les sols salés, de me limiter à quatre idées. Je n'ai donc pas la prétention d'être exhaustif.

La première, c'est que *les colonnes de sol* restent un bon outil d'étude des mécanismes de la salinisation, pour peu que les expériences soient conçues astucieusement (1) : je pense à la série de thèses menées sous la direction de DABIN : celles de MASSOUMI, KOUHESTANI, JABER, UL HACQ et à toutes les informations qu'elles nous ont apportées sur le rôle de la composition ionique des solutions, de la superposition d'horizons de texture différente, etc.

Les deux idées suivantes résultent d'un examen critique des modèles de simulation actuels. On constate d'abord que *le rôle de la matière organique* sur les phénomènes de salure est pratiquement ignoré dans ces modèles. Or ce rôle n'est pas négli-

geable, comme le montrent les travaux récents de VIEILLEFON puis MARIUS et FELLER sur les mangroves, de M^{me} DUPUIS et de CHEVERRY sur les sédiments organiques du lac Tchad, et surtout de GALLALI (Tunisie).

On constate ensuite, et c'est une autre caractéristique des modèles, que l'approche géochimique est essentiellement basée sur des considérations d'ordre thermodynamique. Or des études expérimentales *d'ordre cinétique*, notamment celles de DELMAS, de l'I.N.R.A., montrent que les phénomènes de dissolution-précipitation des sels sont en fait très complexes. Il faudra donc que les pédologues des sols salés aillent bientôt « regarder de ce côté-là ».

La quatrième et dernière idée relative aux perspectives des recherches en laboratoire me servira d'introduction à la rubrique « morphologie des sols ».

5. LA MORPHOLOGIE DES SOLS SALÉS

Problèmes de classification, de cartographie

Cette quatrième idée peut s'exprimer ainsi : je crois beaucoup à l'avenir des recherches sur *l'organisation morphologique des argiles*, à l'étude du rôle de la nature minéralogique de ces argiles, de leur garniture cationique, de leur histoire hydrique et énergétique sur les modalités de cette organisation. Cela suppose de travailler à des échelles d'observation et de mesure fines et je pense ici à la voie que nous ouvre TESSIER de l'équipe PEDRO (I.N.R.A.).

Les futurs sols salés du monde, et il y en aura malheureusement, seront en effet fréquemment des sols de plaines, de vallées, que l'on irriguera grâce à de grands travaux d'hydraulique. Pour se limiter à l'Afrique francophone, pensons à l'aménagement proche des vallées des fleuves Sénégal et Niger. Or ces sols ont souvent une texture fine : le danger le plus grave qui les menace n'est pas la salinisation, mais les conséquences physiques (dégradation de la structure) de l'alcalinisation, qui risque de suivre la dé-salinisation.

On rejoint là la grande leçon que G. AUBERT nous a inculquée à tous : l'étude morphologique des sols salés est un merveilleux outil de compréhension de la genèse de ces sols, de leur fonctionnement actuel, donc un outil pour leur mise en valeur. Cela a été la grande force des pédologues de l'école AUBERT et de leurs amis. Je citerai quelques noms : l'équipe animée par ROEDERER, puis COINTEPAS, en Tunisie,

(1) Certaines peuvent être même faites *in situ* : travaux de l'A.C.C. - O.R.S.T.O.M., Grenoble, au Djebel Dissa en Tunisie.

avec MORI, SOURDAT, BUREAU, PONTANIER, FOURNET et leurs collègues tunisiens SOUSSI, BELKODJA, HAMZA et d'autres, qui ont pris le relais. POUGET, MECHAÏ en Algérie, RUELLAN, M^{me} FARAJ au Maroc, DUBOIS, VIEILLEFON, MARIUS au Sénégal, PIAS, BOCQUIER, CHEVERRY, RIEU au Tchad, BOUTEYRE, TOUJAN, SERVANT...

La liste des personnes et des pays est impressionnante, et pourtant probablement incomplète.

Mais, et cela n'est qu'apparemment un paradoxe, il nous faudra encore beaucoup travailler en ce domaine : l'analyse pédographique chère à BOCQUIER est encore balbutiante en matière de sols salés. Il nous faudra observer encore, avec plus de précision, la forme des cristaux de sels, leur relation avec la porosité, les relations entre les cristaux de sels différents... Nous en « tirons » probablement des leçons sur la chronologie de précipitation de ces sels, sur leur aptitude à être effectivement dissous, etc.

À la clef, il y a aussi, vous vous en doutez, les problèmes de classification et de cartographie des sols salés. Vous connaissez la force avec laquelle G. AUBERT défend le rôle de la morphologie dans la classification des sols salés, à partir notamment de la notion de sols à structure dégradée.

Quant à la cartographie, comment mieux synthétiser le rôle international de G. AUBERT qu'en

présentant la carte à 1/5.000.000^e des sols salés d'Afrique, dont la réalisation lui a été confiée par l'Association Internationale de Science du Sol et l'U.N.E.S.C.O. ? On y trouve l'illustration d'un certain nombre des idées chères à son responsable : — la prise en compte des sols à alcalis, largement représentés en Afrique et dont les propriétés morphologiques conditionnent la mise en valeur; — la prise en compte des sols de mangroves; — la prise en compte des zones à risque de salure, le delta du Niger par exemple; — et enfin la cartographie des zones à présence de sols salés, et pas seulement celle des zones à prédominance des sols salés, le pourcentage étant d'ailleurs indiqué.

Pour terminer cette évocation, peut-être un peu disparate, des travaux récents de l'« École AUBERT » sur les sols salés, et de leur « accrochage » très réel aux perspectives d'avenir, de modélisation, je me permettrai une anecdote personnelle, en hommage à celui qui nous a formés. Lors de notre année de formation à l'O.R.S.T.O.M., le premier solonchak dont G. AUBERT nous a fait découvrir avec enthousiasme les caractères morphologiques était localisé... dans la région de Nancy, à cinquante mètres d'une usine. Certes, c'était inattendu, mais un des charmes des tournées avec lui, c'est précisément que l'on peut s'attendre à « savourer » dans la même journée, des sols très divers, l'art gothique d'une église découverte au passage, ou bien... le bon vin local !

Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés

Bernard DABIN

Pédologue O.R.S.T.O.M., Services Scientifiques Centraux, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

RÉSUMÉ

L'auteur rappelle les synthèses faites antérieurement sur les humus des sols tropicaux, et donne par ailleurs des résultats récents obtenus avec une méthode de fractionnement de l'humus qui est décrite, en faisant référence à différents auteurs et différents pays. Une interprétation est tentée sur l'évolution des humus dans les sols tropicaux des régions humides et des régions à climat contrasté.

ABSTRACT

The author recalls the previous syntheses about the humus in tropical soils and, moreover, he gives some recent results obtained through a method of humus fractionation which is described with reference to different authors and countries. An attempt was made to interpret the evolution of humus in the tropical soils of the humid regions and of the regions with well-marked climates.

Introduction

Dans ce bref article de synthèse sur les humus des sols tropicaux, nous désirons seulement faire ressortir quelques éléments de caractérisation analytique des sols tropicaux, tels que nous les pratiquons à l'O.R.S.T.O.M. depuis une dizaine d'années. Ces méthodes analytiques ont permis de mieux définir les humus de certains types de sols qui rentrent dans le cadre de la classification C.P.C.S. dont G. AUBERT a été l'un des principaux fondateurs.

En ce qui concerne les conditions de formation et d'évolution biologique des matières organiques dans les sols tropicaux, nous nous référons à la synthèse, présentée en 1973 dans le Tome 4 de l'ouvrage sur les sols ferrallitiques et plus particulièrement nous

faisons un bref rappel des données rassemblées par P. de BOISSEZON sur le bilan des matières organiques sous forêt et sous savane.

1. QUELQUES RÉSULTATS DU BILAN DES MATIÈRES ORGANIQUES TROPICALES

De BOISSEZON indique, pour la forêt tropicale humide, une biomasse de 500 t/ha, et pour la savane soudano-guinéenne, une valeur dix fois moindre. Au point de vue de la production de l'humus, ces différences se trouvent très atténuées. En effet, l'apport annuel au sol en forêt ne serait que de 25 tonnes par an, et en savane de 11 tonnes. Le rapport entre le poids de litière et l'apport de

matières végétales au sol est plus important sous savane que sous forêt, en raison de l'humidité réduite en saison sèche en savane, qui limite la décomposition de la litière. Le coefficient de transformation est de 0,1 sous forêt et de 0,2 sous savane (néanmoins sous savane, il faut compter de fortes pertes par les feux de brousse).

Le taux d'humification moyen des matières végétales est de 10 à 20 %; quant au taux annuel de minéralisation, il varie de 1,7 à 4 % en forêt et de 0,5 à 1,3 % en savane. On note d'importantes différences suivant les types de végétation et les climats; par ailleurs la mise en culture peut provoquer des pertes considérables par érosion (jusqu'à 20 % par an sol nu), d'après les résultats des cases d'érosion d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire.

2. QUANTITÉS DE MATIÈRES ORGANIQUES DANS LES SOLS TROPICAUX

Les teneurs en matière organique des sols sous forêt peuvent être très importantes dans les trois ou cinq premiers centimètres : jusqu'à 5 % ou 10 % du sol sec, parfois davantage; ces teneurs diminuent très rapidement en profondeur (2 % à 0,25 m, 1 % à 0,50 m).

Dans les sols sous savane, les taux de matière organique sont plus faibles en surface, mais décroissent plus lentement dans les trente premiers centimètres. Il existe une relation étroite entre la quantité de carbone et la teneur du sol en éléments fins (argile et limon fin). Pour une texture donnée, la teneur en matière organique diminue avec la pluviométrie, elle est très basse dans les sols sableux des régions sèches (moins de 1 %).

En ce qui concerne la température, au-delà de 25° en sol aéré, la destruction d'humus dépasse la production d'humus; par contre, en sol d'altitude, l'abaissement de température accroît la quantité de matière organique. En ce qui concerne la pénétration de l'humus en profondeur, ROOSE (1970) a montré que les produits solubles ou pseudosolubles provenant de la décomposition de la litière migrent surtout verticalement dans les profils, mais que, dans l'horizon B, les teneurs des eaux de drainage sont 2 à 4 fois plus faibles que dans les horizons A₁ et A₃; les matières organiques entraînées sont insolubilisées ou minéralisées dans une large mesure.

C'est surtout l'analyse des matières humiques dans les horizons profonds des sols ferrallitiques qui confirme la migration profonde des composés organiques peu polymérisés. Nous verrons dans les paragraphes suivants comment cette pénétration augmente dans les sols où la minéralisation se trouve ralentie.

3. ÉVOLUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES EN FONCTION DES CONDITIONS DE SOL ET DE CLIMAT

L'augmentation des matières organiques dans les sols de texture lourde s'accompagne d'une augmentation du rapport C/N. Il se produit soit un léger engorgement, soit un taux de décomposition plus faible des complexes argilo-humiques, soit une limitation de la migration des complexes humifères.

1. DANS LES SOLS FORESTIERS HUMIDES, le rapport C/N décroît lorsque le taux de bases et le pH augmentent (LENEUF 1959; LÉVÊQUE 1967). Il est plus élevé en bas de pente que sur un versant soumis à l'érosion (De BOISSEZON 1969; LÉVÊQUE 1967).

2. DANS LES SOLS DE SAVANE, les rapports C/N sont généralement très élevés, de 15 à 19. Dans ce cas, c'est essentiellement la végétation graminéenne, riche en lignine et pauvre en azote, qui en est la cause.

De BOISSEZON 1973 signale l'existence de débris de charbon dans ces sols, mais H. LEROUX (1980) montre que ces débris ont peu d'influence sur le rapport C/N; en revanche, il existe une corrélation de Spearman positive dans les horizons de surface de nombreux sols de savane, entre la valeur du rapport C/N, la teneur relative en acides humiques gris de l'extrait pyrophosphate, et leur degré de polymérisation. Le C/N est donc lié à l'évolution de la matière organique; de même, il diminue rapidement en profondeur, en même temps que la décomposition de la matière humique et sa dépolymérisation.

3. CAUSES DE L'ÉVOLUTION DES MATIÈRES HUMIQUES

Action de la texture

Dans les régions sèches, en sols sablo-argileux drainés, l'augmentation du taux d'éléments fins qui accroît la réserve en eau, favorise l'accumulation de matière organique totale, mais diminue le rapport C/N et le taux d'acides humiques gris; par contre, dans les climats contrastés intermédiaires, en sols plus argileux provenant de schistes et roches basiques, l'accroissement des éléments fins s'accompagne d'une élévation parallèle du taux de matière organique, du rapport C/N et du taux relatif d'acides humiques gris; il y a dans ce cas effet de protection par l'argile, signalé antérieurement.

Action de l'humidité et de la sécheresse

En climat sec, il existe une corrélation de Spearman positive (H. LEROUX 1980) entre la teneur relative en débris végétaux non décomposés extraits du sol par densité, et la teneur relative de l'humus en acides humiques gris; ces valeurs sont d'autant plus élevées que les sols sont plus sableux.

En revanche, en climat plus humide, on observe la formation d'acides humiques migrant davantage à l'électrophorèse, donc avec un poids moléculaire plus faible et une charge électrique plus élevée. Il semble donc que les matières végétales donnent naissance assez rapidement à des molécules humiques fortement condensées, ces dernières se stabilisant dans les climats secs par déshydratation, mais aussi en raison de la courte période de décomposition; par contre, dans les climats humides, il se produit une évolution progressive des acides humiques vers des formes de moins en moins condensées et de plus en plus oxydées (acides humiques gris migrants et acides humiques bruns).

4. ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DES FRACTIONS HUMIQUES DANS LES SOLS TROPICAUX

1. Généralités sur les méthodes d'analyse

Une des méthodes de caractérisation des humus est la détermination quantitative et qualitative d'un certain nombre de fractions qui sont séparées soit par des procédés chimiques, soit des procédés physiques.

Les méthodes chimiques consistent en épuisements successifs et séquentiels, par des réactifs différents, d'abord acides, puis complexants et alcalins, puis fortement alcalins non complexants. Les extractions se font d'abord à froid sans destruction du support minéral, puis après des prétraitements plus ou moins énergiques qui éliminent les sesquioxides et l'argile. On obtient ainsi des fractions de l'humus de poids moléculaire croissant et présentant des forces de liaison de plus en plus fortes avec le support minéral.

Les méthodes physiques sont appliquées aux fractions pour déterminer leur poids moléculaire : électrophorèse, filtration sur gels Sephadex, absorption en lumière visible à différentes longueurs d'onde (400-500-600-700 nanomètres).

De même, certaines propriétés de la molécule humique, comme les fonctions périphériques (chaînes aliphatiques, fonction acides carboxyliques et acides phénols), les liaisons aromatiques ou protéiques, sont décelables sur les spectres infrarouges, ainsi que les complexes métalliques.

Enfin des dosages chimiques, par analyse élémentaire (CHNO), titration directe de la capacité d'échange, analyse après hydrolyse, des molécules de base, ou des formes de l'azote, permettent de cerner les propriétés principales des produits extraits. Il reste enfin des méthodes plus complexes (isotopiques et spectroscopiques) utilisées dans certains laboratoires spécialisés.

Parmi les méthodes de fractionnement humique, de BOISSEZON (1973) rappelle certains résultats obtenus avec la méthode Tiurin, qui est l'une des plus anciennes, mais plus guère utilisée aujourd'hui. De même, la méthode DUCHAUFOUR et JACQUIN (1966) a été exploitée pour l'étude des sols tropicaux, en particulier par PERRAUD (1970).

Depuis 1971, les laboratoires O.R.S.T.O.M. utilisent une méthode simplifiée inspirée des deux méthodes précédentes, dont nous donnons ci-après les principes essentiels et quelques résultats.

2. Méthode de fractionnement de l'humus

2.1. PRODUITS SOLUBLES

(a) Technique d'extraction

Sur le sol broyé et tamisé à 0,5 mm, on fait un premier traitement à l'acide phosphorique 2 M qui sépare par densité les matières organiques non décomposées dites « matières légères » et qui dissout une fraction d'acide fulvique appelé acide fulvique « libre » ou mobile.

Sur le culot lavé à l'eau, un second traitement au Pyrophosphate de soude 0,1 M à pH = 9,8 extrait les acides humiques fixés sur le complexe absorbant du sol, et une fraction d'acides fulviques, liés à ces acides humiques.

Enfin, après épuisement par le réactif précédent, le sol est traité par la soude 0,1 N à froid, également jusqu'à épuisement, pour extraire une fraction d'acides humiques solubles à pH élevé, et une fraction d'acides fulviques liés à ce résidu.

On obtient donc six fractions : matières légères, acides fulviques libres, acides humiques et fulviques de l'extrait pyrophosphate, acide humique et fulvique de l'extrait soude. Le résidu insoluble lié à la matière solide s'appelle « humine ».

(b) Nature des produits extraits

1° *Les acides humiques.* Une extraction séquentielle du même genre a été utilisée par SWIFT et POZNER (1976) sur des produits de décomposition de végétaux, au cours d'un essai de longue durée. Les différentes mesures (titration directe, spectre infra-rouge, formes de l'azote, etc.) ont montré que les extraits au pyrophosphate présentaient une acidité carboxylique croissant avec le temps, et supérieure à celle des extraits à la soude, donc un degré d'oxydation plus avancé, avec formation de complexes métalliques.

Le poids moléculaire a par contre tendance à diminuer par rapport à l'extrait à la soude; de même, la teneur en azote total et α aminé, qui est maximum dans l'extrait à la soude aux premiers stades de la condensation humique diminue avec le temps dans les extraits au pyrophosphate.

Toutes les mesures que nous avons effectuées par électrophorèse, montrent que les extraits dans la soude contiennent une majorité d'acides humiques gris très peu migrants, dont le degré de condensation élevé peut être mesuré empiriquement par le rapport d'extinction en lumière visible $\frac{625 \text{ nm}}{512 \text{ nm}}$ qui varie de 0,7 à 0,5 pour les acides humiques gris et de 0,5 à 0,3 pour les acides humiques bruns, montrant des degrés de condensation très variables. Compte tenu de ces résultats, on peut par convention appeler les acides humiques de l'extrait à la soude, acides humiques de « condensation », et les acides humiques de l'extrait au pyrophosphate, acides humiques « de maturation ou d'oxydation ».

2° *Les acides fulviques*. Les réactifs d'extraction séparent trois types d'acides fulviques :

Acides fulviques libres. Le réactif acide phosphorique dissout une quantité variable d'acides fulviques appelés « libres » ou « mobiles ». C'est leur répartition dans le sol qui tend à prouver cette mobilité, en particulier dans les podzols tropicaux : ils sont pratiquement éliminés de la surface par lessivage ; par contre, dans l'horizon B d'accumulation, cette fraction représente plus de 50 % du carbone total, et n'a pas d'autre origine que celle de l'illuviation (rapport 1 à 20 en valeur absolue entre surface et profondeur).

Dans les sols ferrallitiques du Brésil, VOLKOFF et FLEXOR (1978) montrent que le $\delta C 13$ de ces acides fulviques demeure élevé et relativement constant entre la surface et la profondeur, alors qu'il varie pour les autres fractions. Dans les humus en formation (DABIN 1976), cette fraction est relativement abondante, et semble donc se former précocement.

En Côte d'Ivoire, les résultats obtenus pour le pourcentage des différentes fractions dans un humus jeune sont les suivants : humine 82 %, acides fulviques de l'extrait soude 8,4 %, acides fulviques libres de l'extrait phosphorique 4,6 %, acides humiques de l'extrait soude 2,9 %, acides fulviques de l'extrait pyrophosphate 1 %, acides humiques de l'extrait pyrophosphate 0,66 %, matières végétales 0,25 %.

Acides fulviques soude. Une autre fraction d'acide fulvique, séparée des acides humiques du dernier extrait à la soude, est également très abondante dans l'humus jeune. Elle vient en second lieu après l'humine qui semble le premier produit formé (sans doute humine héritée). De même, cet extrait à la soude est abondant dans les sols récemment enrichis en matières organiques ; il diminue rapidement en profondeur du sol, et lorsque le sol est cultivé sans enrichissement organique. Le rapport d'extinction en milieu liquide 400/600 montre qu'il s'agit de

molécules de petite taille, très peu polymérisées (VOLKOFF 1978). Tous ces résultats tendent à prouver que l'on a affaire à des produits solubles provenant de la décomposition des matières végétales ; on peut penser que l'hydrolyse par la soude accroît artificiellement leur proportion ; néanmoins, ils ne sont présents que dans certaines conditions et l'on peut les considérer comme des produits « précurseurs ».

Acides fulviques pyrophosphate. La fraction d'acide fulvique, séparée de l'extrait pyrophosphate, représente généralement la fraction AF la plus importante, excepté dans l'humus jeune où elle est très faible, ainsi d'ailleurs que l'acide humique du même extrait. Cette fraction augmente généralement en profondeur, et dans les sols épuisés par la culture, elle varie en sens inverse des acides fulviques soude (DABIN 1976). On peut donc la considérer comme une fraction de décomposition des acides humiques auxquels elle se trouve liée. Les travaux de SCHNITZER montrent que ces acides fulviques ont une composition chimique très voisine des acides humiques, mais sont plus oxydés, et ont un poids moléculaire plus faible. Ce sont donc des acides fulviques liés, d'oxydation.

2.2. PRODUITS INSOLUBLES (humine)

L'humine est la matière organique humifiée qui subsiste dans le résidu insoluble, après toutes les extractions successives à froid.

Cette humine représente en moyenne 50 % du carbone total (de 30 % à 80 %). Plusieurs auteurs ont présenté des méthodes de séparation (DUCHAUFOR-PERRAUD 1970 ; VOLKOFF 1977). L'humine dite de *précipitation* ou d'insolubilisation, est séparée par la soude après plusieurs prétraitements énergiques (acide sulfurique 2 N à chaud, acides chlorhydrique et fluorhydrique N à chaud) ; ces prétraitements éliminent les hydroxydes et l'argile qui fixent l'humine de précipitation. L'humine dite *héritée* est séparée par densité sur le résidu. C'est donc une matière légère, proche des matières végétales en décomposition ; elle est soluble dans le Bromure d'acétyle. Enfin l'*humine évoluée* est le résidu carboné totalement insoluble dans tous les réactifs.

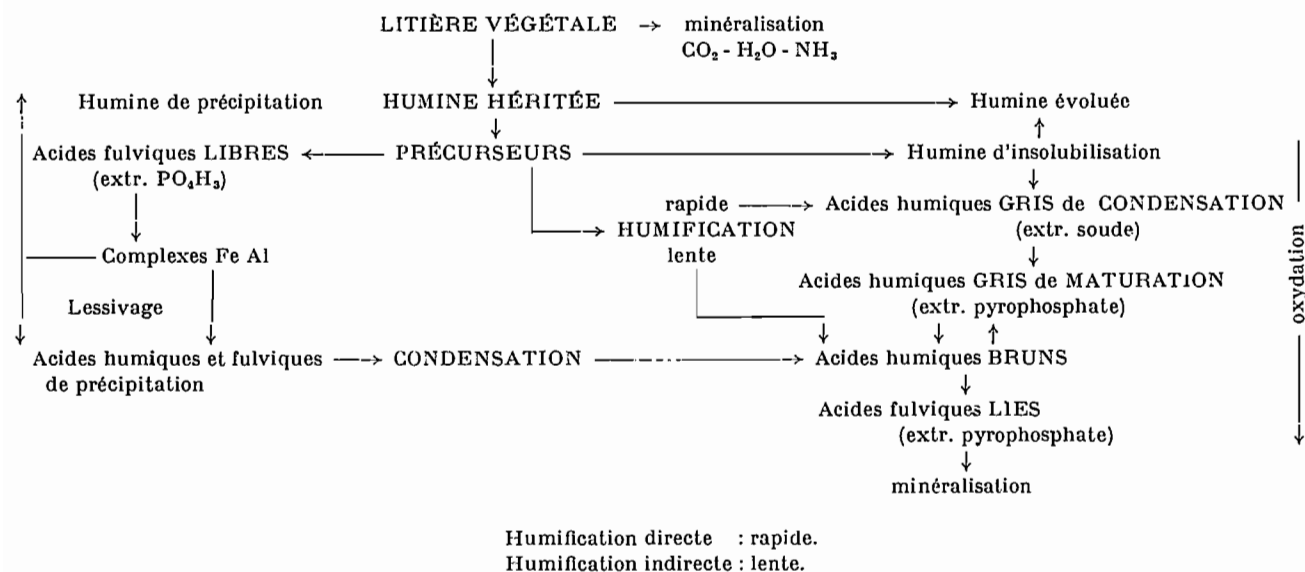
Toutes les fractions ainsi extraites n'ont peut-être pas d'existence réelle, en tant que substances chimiques bien définies, mais elles sont suffisamment reproductibles dans des conditions données et correspondent à des comportements de la matière humique qui sont caractéristiques des différents types de sol.

2.3. RÉSULTATS OBTENUS

Une synthèse est encore actuellement prématurée, d'autant plus que des études d'évolution sous

TABLEAU I

Schéma général de formation des humus tropicaux



culture sont en cours (TURENNE, MOREAU, FELLER). Cependant, de nombreuses analyses ont été réalisées depuis 1971 sur des types de sols variés, en Guyane et aux Antilles par TURENNE (1975, 1977), au Brésil par VOLKOFF et CERRI (1977, 1978, 1980), en Afrique par DABIN (1976) et de nombreux pédologues O.R.S.T.O.M. Plusieurs thèses ont été consacrées à l'étude de l'humus des sols des régions chaudes, NEGARESTAN (Iran et Niger, 1970); DEKADJEVI (Togo, 1974); SOURABIÉ (Haute Volta, 1979); H. LEROUX (Côte d'Ivoire, 1980), pour ne citer que quelques travaux réalisés sur les sols tropicaux. Les sols des pays méditerranéens ont été étudiés par POUGET (Algérie); DELHOUME (Tunisie), mais nous limiterons nos exemples aux régions tropicales.

Comparaison des humus tropicaux et des humus tempérés

Nous avons cherché à utiliser un plan comparable à celui présenté par DUCHAUFOUR dans sa classification biochimique des humus (1977), où il sépare : des humus peu évolués, riches en matières végétales non décomposées, en humine héritée, et en produits humiques peu polymérisés et plus ou moins mobiles; et des humus évolués, soit par évolution biologique dominante, soit par évolution bioclimatique dominante, avec moins de litière, davantage de produits humiques polymérisés et d'humines d'insolubilisation ou évoluées.

En réalité c'est surtout au niveau des humus évolués de type andique ou de type vertique que nous avons pu trouver des rapprochements entre humus tempérés et humus tropicaux, et aussi dans le cas de certains humus à évolution modifiée par hydromorphie lorsque cette action est importante.

Par contre, dans tous les milieux normalement drainés ou dans les sols hydromorphes qui subissent des stades de dessiccation, l'existence de types d'humus « peu évolués » est très rare, et les différents humus évolués ou mull tropicaux ont des caractéristiques particulières qui ne correspondent pas aux humus décrits précédemment.

5. QUELQUES EXEMPLES DE TYPES D'HUMUS DANS DES SOLS TROPICAUX NORMALEMENT DRAINÉS

1. Caractéristiques morphologiques

Les humus sont subdivisés en deux grandes catégories :

- I. Humus des sols sous climat chaud et humide.
- II. Humus des sols sous climat contrasté.

Dans la catégorie I, les sols ont été classés dans un ordre approximatif de décomposition croissante de l'humus :

- Podzol tropical.
- Sol ferrallitique humifère.
- Sol lessivé tropical sur calcaire.
- Sol ferrallitique typique et fortement désaturé.

Dans la catégorie II, les sols ont été classés dans l'ordre de sécheresse croissante du climat, amenant en sens inverse un obstacle à la décomposition :

- Sol ferrallitique faiblement désaturé.
- Sol ferrugineux tropical lessivé.
- Sol ferrugineux tropical non lessivé.

Il est très difficile de différencier les humus tropicaux, du moins dans les sols normalement drainés, sur la base des caractères morphologiques, car on a affaire le plus souvent à des humus de type Mull avec une litière très peu épaisse, sinon inexistante, qui repose sur un horizon minéral où l'humus est bien décomposé et fortement incorporé.

Les critères principaux sont liés à l'intensité d'accumulation humique qui se manifeste par la couleur de l'horizon, éventuellement par sa structure, et par la pénétration humique en profondeur qui est aisément décelable. Dans les sols les plus sableux, comme les podzols, les sols ferrallitiques lessivés, les sols ferrugineux très sableux, on peut déceler à l'œil des débris organiques peu décomposés, ou des agrégats humiques dans certains cas. Une étude plus fine à la loupe ou au microscope permettrait peut-être de décrire des caractères micromorphologiques, mais elle n'a pas toujours été faite.

Le podzol tropical présente un horizon A₁ très coloré, riche en matière organique bien décomposée, sur une épaisseur d'environ 15 à 20 cm. Par contre, la litière est peu épaisse, bien que relativement plus importante que dans d'autres sols tropicaux. Le substratum est très sableux. L'horizon d'accumulation B ou « alios » est très caractéristique et voisin de celui des podzols tempérés, et présente une induration nette, avec un ciment humique de couleur noire.

Le sol ferrallitique humifère possède lui aussi une litière superficielle peu épaisse; par contre, l'horizon humifère A₁ peut avoir jusqu'à 1 m d'épaisseur dans un substratum relativement argileux. La couleur brun très foncé, dans les 30 premiers centimètres, due à une richesse en humus élevée, s'éclaircit progressivement jusqu'au brun-jaune foncé vers 1 m; la structure est grumeleuse sur toute l'épaisseur.

Le sol lessivé sur calcaire, est un profil peu épais, le calcaire apparaissant à 1 m de profondeur. Il y a peu ou pas de litière; l'horizon humifère, assez riche en matière organique, à une vingtaine de centimètres d'épaisseur; il est brun sombre, avec une texture sablo-argileuse et une structure grumeleuse, puis il passe progressivement à brun-jaune, argilo-sableux,

puis rouge-jaune, nettement argileux, au-dessous de 0,40 m. Il apparaît un fort gradient d'argile et de fer en profondeur; quant à l'humus, il disparaît rapidement au-dessous de 0,20 m.

Le sol ferrallitique typique ou fortement désaturé montre également une litière très peu épaisse en sol sableux, et inexistante en sol argileux. L'horizon A₁ humifère, observable en raison de sa couleur plus sombre, n'a pas plus de 5 ou 8 cm d'épaisseur; on passe ensuite progressivement à des horizons de couleur beige, jaune ou rouge jaune, suivant le type de sol.

Le sol ferrallitique faiblement désaturé est également pauvre en litière mais montre un horizon A₁ humifère plus épais que le précédent, jusqu'à 15 ou 20 cm, apparemment plus foncé et plus riche; au-dessous, la disparition de l'humus est également rapide, pour faire place aux horizons de couleur généralement rouge vif. La texture de l'horizon humifère est argilo-sableuse et sa structure grumeleuse.

Les différents sols ferrallitiques peuvent être appauvris en surface, mais ne présentent pas d'horizons d'illuviation très tranchés en profondeur.

Le sol ferrugineux tropical lessivé a un horizon humifère d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur; la texture peut être variable, de sablo-argileuse à argilo-sableuse; la structure a un aspect massif plus ou moins cohérent; on observe d'assez nombreuses racines de graminées.

La couleur passe du beige en surface au jaune-rouge en profondeur; l'horizon humifère est assez bien tranché; on observe un net gradient de texture et d'accumulation d'oxydes en profondeur.

Le sol ferrugineux tropical non lessivé. Bien que pauvre en matière organique, ce sol présente une pénétration humique qui colore le substratum sableux jusque vers 35 cm; la couleur passe du beige un peu foncé en surface au beige clair en profondeur; la structure est particulière et peu cohérente; on observe de nombreux débris de racines dans la masse de l'horizon A₁. L'horizon de profondeur, au-dessous de 0,50 m, est légèrement coloré en ocre par des oxydes de fer.

2. Caractéristiques physico-chimiques des sols tropicaux (dans les milieux normalement drainés)

2.1. HUMUS DES CLIMATS CHAUDS ET HUMIDES (forêt tropicale)

(a) Sol à humification directe, avec condensation forte et maturation moyenne des acides humiques, et très forte migration des produits solubles. Précipitation en profondeur des produits de migration.

TABLEAU II
Pourcentages relatifs des différentes fractions humiques. % du C total

Prof. cm	Matières légères végétales	Acides fulviques soude (Précur- seurs)	Acides fulviques libres mobiles	Acides fulviques liés-pyro- oxydation	Acides humiques Pyro- maturation	Acides humiques soude Conden- sation	Humine totale	C total ‰	
Podzol tropical									
Surf. 0-10	5,94	4,03	0,36	1,05	11,3	24,09	50	(BRÉSIL)	113
Prof. 120	1,15	1,19	47,76	2,86	8,68	0,79	34		25
Sol ferrallitique humifère									
0-10	2,48	2,28	11,69	5,78	19,35	4,98	50	(BRÉSIL)	56
20	1,48	1,70	18,49	5,5	16,81	3,29	50		35,8
40	2,65	2,9	17,03	6,4	12,9	1,77	55		19,2
60	1,77	4,19	18,14	6,77	9,75	1,12	56		12,4
90	0,92	4,96	20	7,99	6,9	0,64	56		9,3
Sol ferrallitique typique									
0-10	2,9	18	4,9	13,2	9,7	11	41	(CAMEROUN)	15,4
25-30	ε	17,6	9	16,5	8,7	7,2	38		6,7
60-90	ε	22,5	17,4	16,5	1,9	2,85	39		6,29
Sol lessivé sur calcaire									
0-15	1,93	8,72	4,59	3,94	6,59	3,73	70,48	(BRÉSIL)	48,7
36-90	0,38	7,9	17,3	2,8	0,96	0,96	69,7		5,18
Sol ferrugineux tropical lessivé									
0-15	12,8	5,24	4,49	4,87	9,36	4,12	59,18	(HAUTE)	2,67
30-40	5,3	10,23	7,2	6,82	4,17	0,76	65,5	VOLTA	2,64
Sol ferrugineux tropical non lessivé Ac. fulv. lib.+Pyro Ac. Hum. Pyro									
0-20	20			6	8		66	(NORD)	5
30-40	23			6	9		62	CÔTE D'IVOIRE	2

PODZOL TROPICAL (Forestier) (tabl. II et III)
(fig. 1 et 2)

Horizon supérieur — Litière moyenne à faible.
— Humine en proportion moyenne de type hérité.
— Forte proportion d'acides humiques de condensation à poids moléculaire élevé.
— Proportion moyenne de précurseurs.
— Très peu d'acides fulviques mobiles (lessivés).

Horizon B

— Proportion considérable (plus de la moitié du carbone) d'acides fulviques mobiles (ou libres) précipités par les ions complexants.
— Proportion moyenne d'acides humiques de maturation peu polymérisés (acides humiques bruns).
— Proportion faible d'humine de précipitation.

(b) Sol à humification directe, avec forte maturation et pénétration en profondeur, d'acides humiques de

TABLEAU III

Quelques résultats d'électrophorèse des acides humiques
Pourcentage relatif des différentes fractions. Rapport des densités optiques
des fractions aux longueurs d'onde 625 mm et 512 mm

Podzol Tropical (Surface)						
Extrait Pyrophosphate				Extrait Soude		
0-10 cm	Acides humiques gris	Intermédiaire	Acides humiques bruns	Acides humiques gris	Intermédiaire	Acides humiques bruns
% de AH	63 %	12,5 %	24,5 %	74 %	7 %	19 %
QE = $\frac{625}{512}$	0,68		0,45	0,70		0,42
Podzol Tropical (Profondeur)						
Extrait Pyrophosphate				Extrait Soude		
120 cm	Acides humiques gris	Intermédiaire	Acides humiques bruns	Acides humiques gris	Intermédiaire	Acides humiques bruns
% de AH	50 %	19 %	31 %	extrait insuffisant		
QE = $\frac{625}{512}$	AHG+1 0,57		0,47			
Sol ferrallitique humifère (Surface)						
0-10 cm						
% de AH	59,5 %	12,5 %	28 %	71 %	9,5 %	19,5 %
QE = $\frac{625}{512}$	0,65		0,50	0,70		0,46
(Profondeur)						
20 cm						
% de AH	58,5 %	11,5 %	29 %	67 %	10 %	23 %
QE = 6/5	0,66		0,50	0,64		0,50
40 cm						
% de AH	61,5 %	11,5 %	27	extrait insuffisant		
QE = 6/5	0,69		0,50			
60 cm						
% de AH	61,5 %	12,5 %	26 %			
QE = 6/5	0,67		0,50			
90 cm						
% de AH	60 %	11	28,5 %			
QE = 6/5	0,66		0,50			
Sol lessivé sur calcaire (Surface)						
0-15 cm						
% de AH	39 %	10 %	51 %	48,5 %	8,5 %	43 %
QE = 6/5	0,54		0,50	0,57		0,47
extraits insuffisants Pyrophosphate et Soude en profondeur						

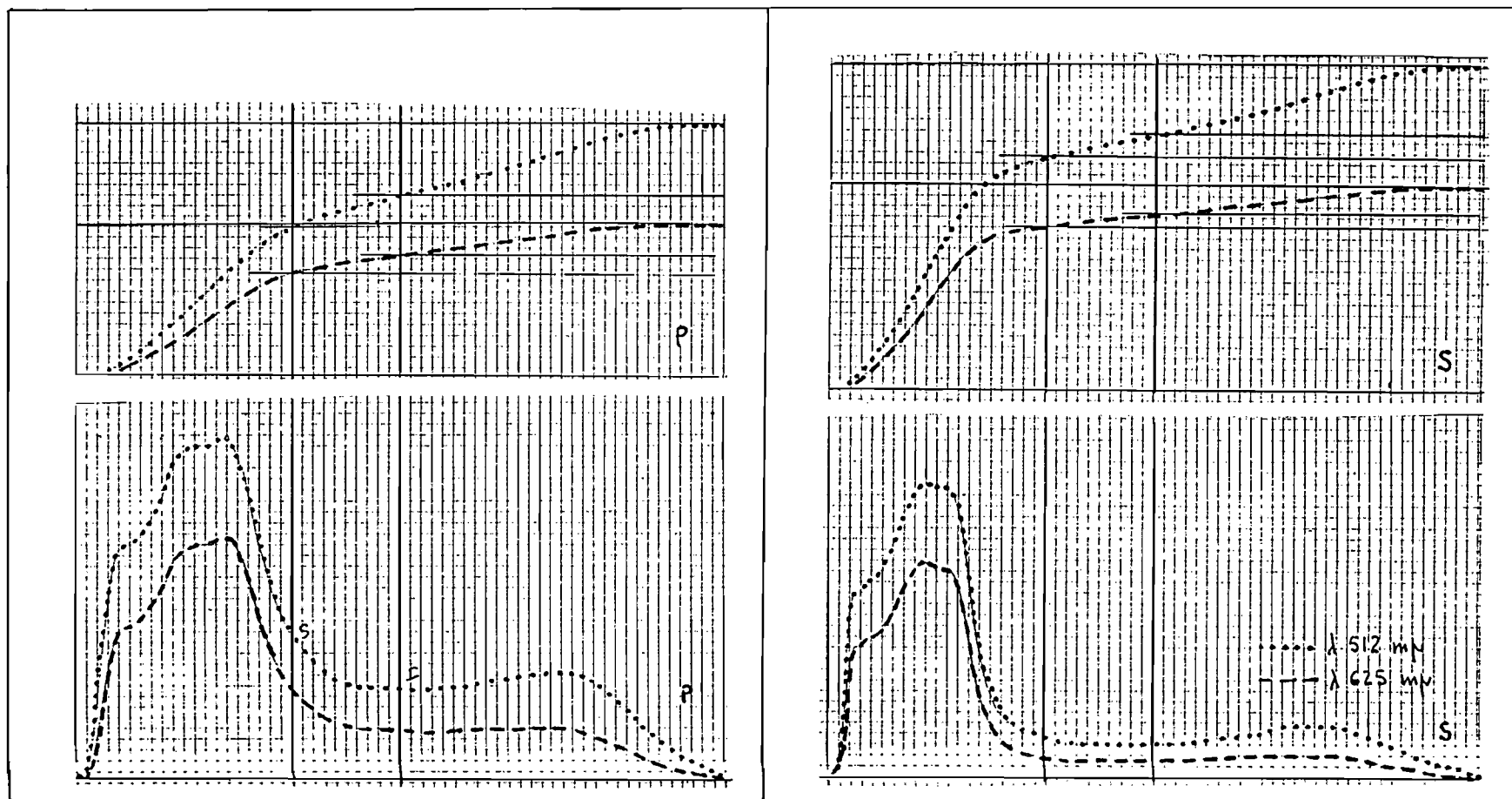


Fig. 1. — Type de sol : podzol tropical de nappe (Histic Tropaquod) Hor. A. (P : extrait pyrophosphate ; S : extrait Soude).

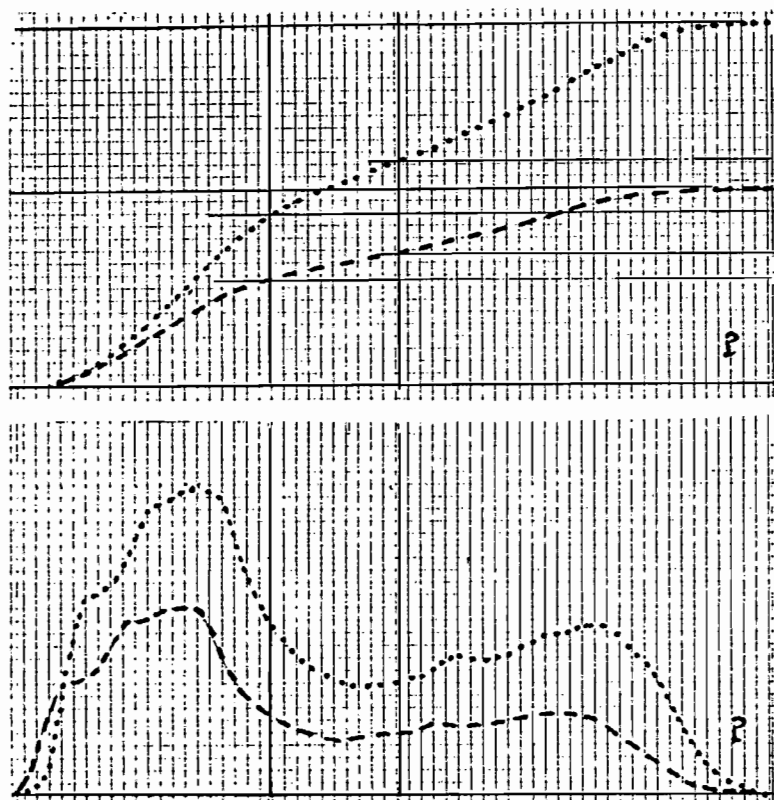


Fig. 2. — Type de sol : podzol tropical de nappe (Histic Tropaquod) Hor. B. Alios humique. (P : extrait pyrophosphate).

poids moléculaire élevé. Pénétration forte et progressive d'acides fulviques libres.

— Humine héritée abondante en surface, et humine de précipitation en profondeur.

SOL FERRALLITIQUE HUMIFÈRE (tabl. II et III)
(fig. 3 et 4)

- | | |
|------------|---|
| Surface | — Litière moyenne, humine héritée abondante, dominance d'acides humiques gris à poids moléculaire élevé. Forte proportion d'acides fulviques libres. |
| Profondeur | — Pénétration continue de matière organique humifiée jusqu'à 1 m. Dominance d'acides humiques gris de maturation, et disparition des produits de condensation.
— Disparition de l'humine héritée, et augmentation de l'humine de précipitation.
— Proportion très forte, double de la surface, des acides fulviques libres liés aux métaux complexants (aluminium) dans un substratum argileux. |

(c) *Sol à humification ralentie en surface*, mais à forte biodégradation et migration de produits solubles en profondeur.

SOL LESSIVÉ TROPICAL SUR CALCAIRE (tabl. II et III, fig. 11).

- | | |
|------------|---|
| Surface | — Litière moyenne à faible ; très forte proportion d'humine héritée, précurseurs abondants, acides humiques bruns dominants. |
| Profondeur | — Disparition rapide de la matière organique ; très forte proportion relative d'acides fulviques libres ; très peu d'acides humiques peu condensés ; humine importante. |

(d) *Sol à humification directe rapide*, avec très forte oxydation et dépolymérisation des produits de condensation humique, production importante et biodégradation en profondeur d'acides fulviques.

SOLS FERRALLITIQUES TYPIQUES ET FORTEMENT DÉSATURÉS (tabl. II, fig. 5)

- | | |
|------------|---|
| Surface | — Litière faible, humine peu abondante avec dominance d'humine héritée et humine de précipitation.
— Forte proportion de produits alcalinsolubles, acides humiques de condensation et acides humiques de maturation à faible poids moléculaire (acides humiques bruns) dans les sols argileux, et à poids moléculaire plus élevé (acides humiques gris) dans les sols sableux. Nette dominance des acides fulviques sur les acides humiques (rapport 1,5 à 2). |
| Profondeur | — Disparition rapide de la matière |

organique et des acides humiques (surtout de condensation), diminution des poids moléculaires, augmentation relative des acides fulviques et de l'humine évoluée, disparition de l'humine héritée.

2.2. HUMUS DES RÉGIONS CHAUDES A CLIMAT CONTRASTÉ

(a) *Limite forêt-savane*

Humification directe moyenne, bonne condensation des acides humiques et forte maturation des produits moyennement polymérisés. Production équivalente d'acides fulviques mobiles, qui migrent et se biodégradent assez fortement en profondeur.

SOLS FERRALLITIQUES FAIBLEMENT DÉSATURÉS (fig. 10)

- | | |
|------------|--|
| Surface | — Litière faible, humine plus abondante que dans les sols ferrallitiques typiques. Dominance d'humine évoluée sur l'humine héritée.
— Acides humiques de condensation et de maturation en proportion moyenne, avec dominance de produits polymérisés (acides humiques gris), mais plus d'un tiers d'acides humiques bruns.
— Acides fulviques en proportion équivalente aux acides humiques. |
| Profondeur | — Dépolymérisation et disparition rapide des acides humiques, augmentation relative des acides fulviques et de l'humine évoluée. |

(b) *Savane soudano-guinéenne*

- Climat très contrasté. Saison humide et saison sèche de durée à peu près équivalente.
- Humus très fortement influencé par la végétation graminéenne de savane très ligneuse (C/N élevé).
- Quantité et qualité de la matière organique nettement corrélées au taux d'éléments fins du sol (argile et limon fin).
- Humification directe limitée par la durée de la saison humide, condensation et maturation des acides humiques ; début d'oxydation en saison des pluies puis déshydratation en saison sèche, avec formation de produits condensés résistant à la biodégradation.
- Produits solubles en quantité moyenne à faible, pouvant migrer pendant la saison humide.

SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX LESSIVÉS (tabl. II, fig. 7)

- | | |
|---------|--|
| Surface | — Litière peu abondante, humine en proportion forte (60-70 %), davantage |
|---------|--|

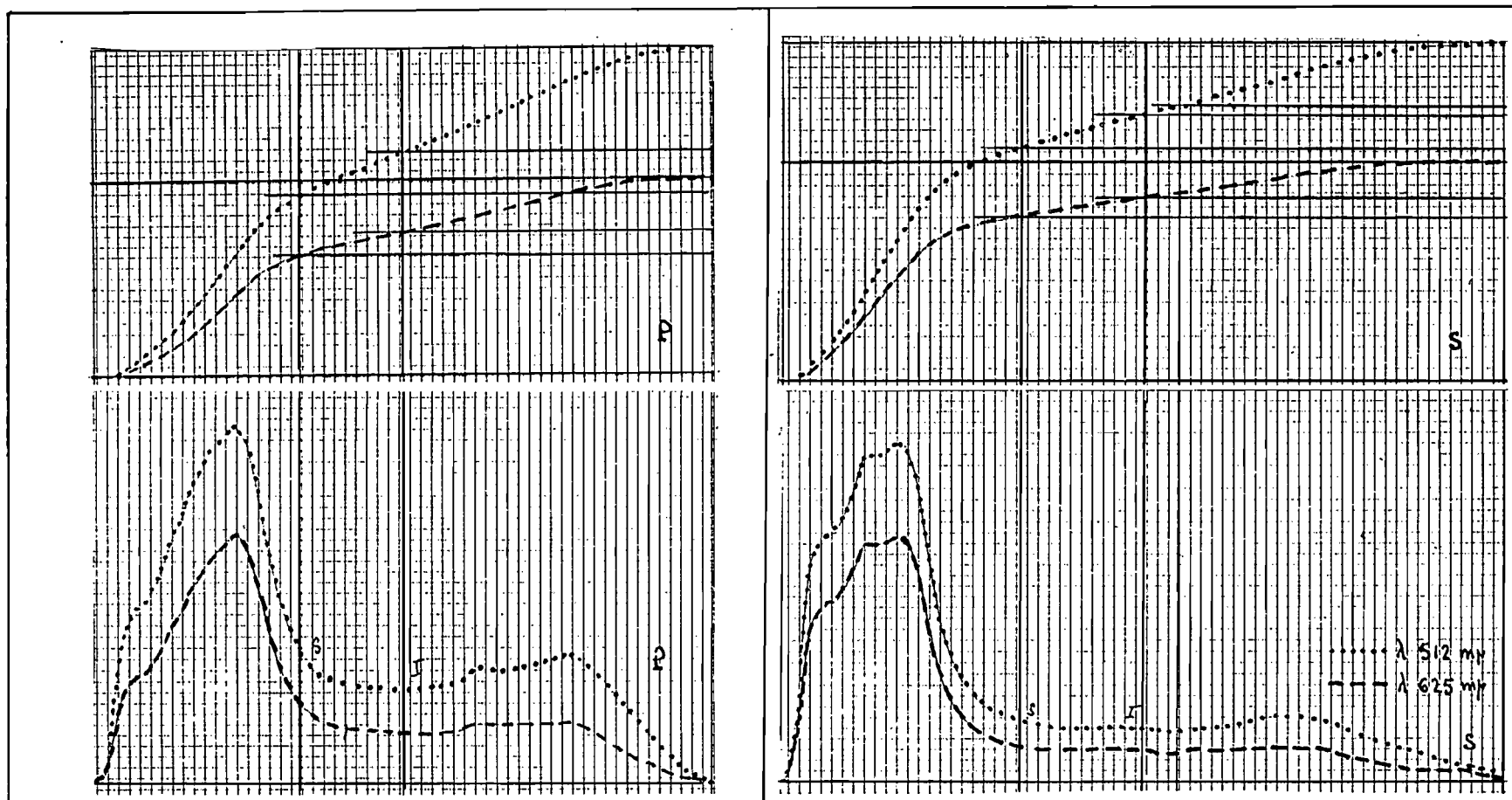


Fig. 3. — Type de sol : sol ferrallitique humifère (Umbriorthox) surface. (P : extrait pyrophosphate ; S : extrait Soude).

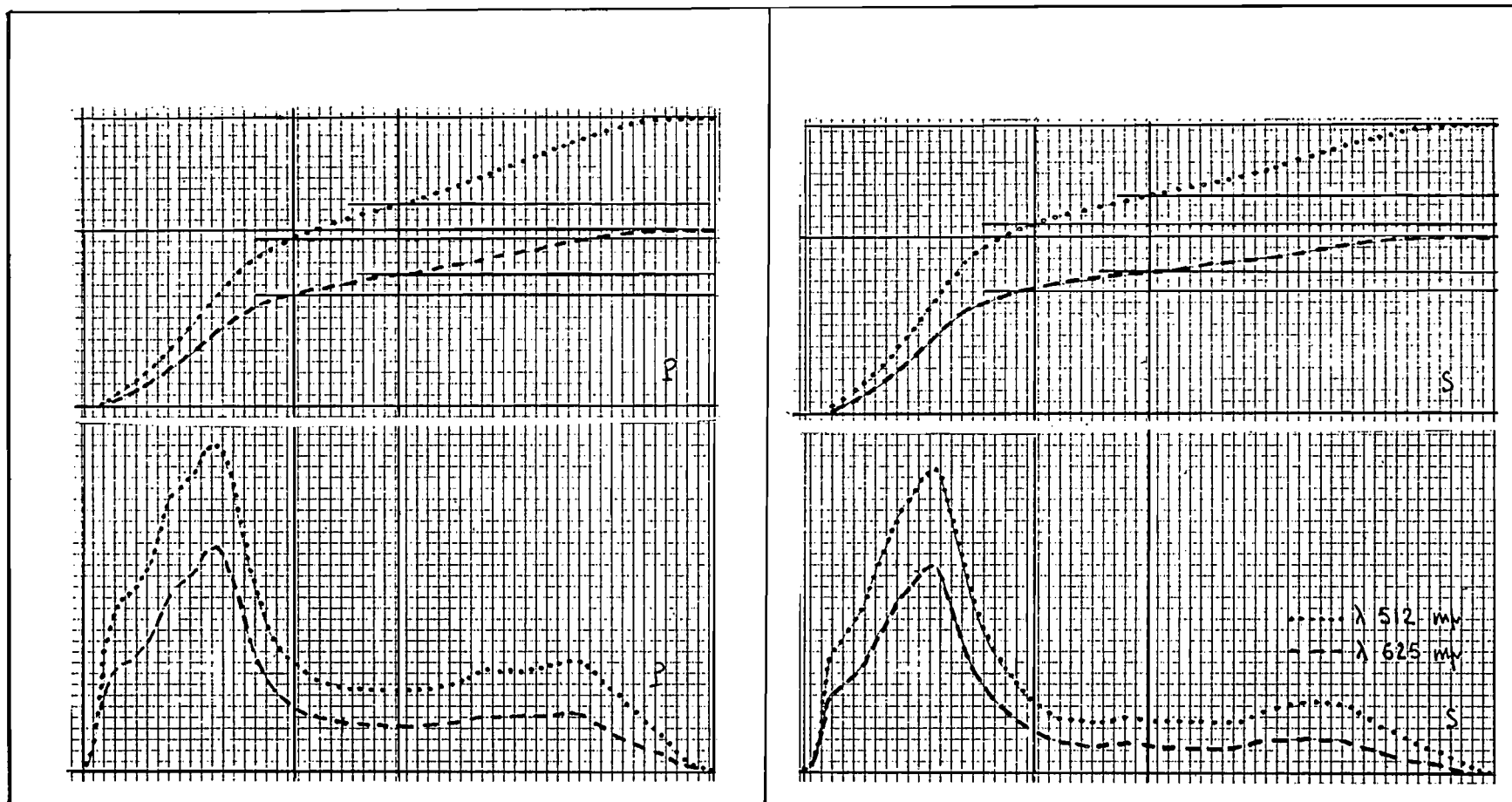


Fig. 4. — Type de sol : sol ferrallitique humifère (Umbriorthox) horizon sous-jacent. (P : extrait pyrophosphate ; S : extrait soude).

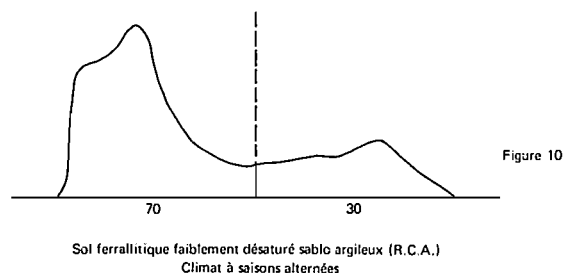
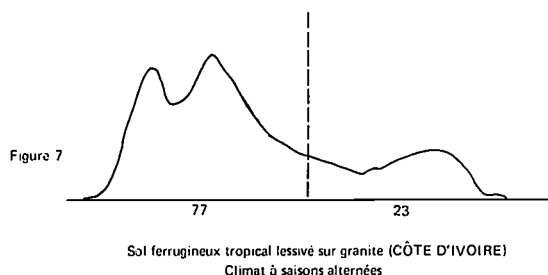
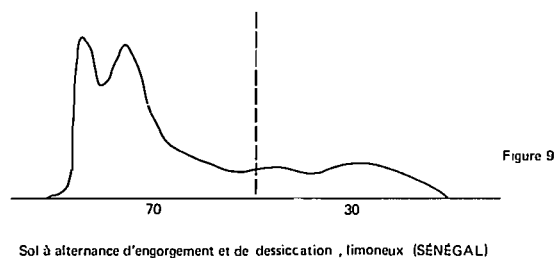
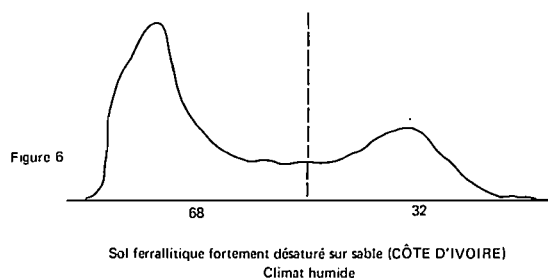
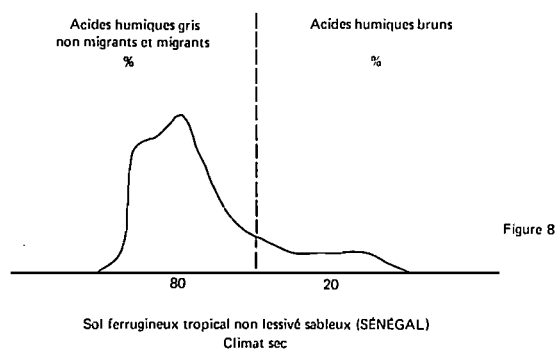
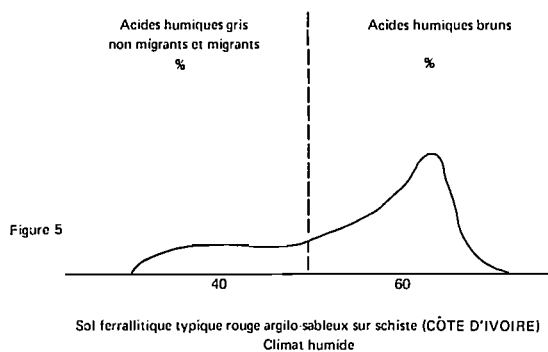


Fig. 5, 6, 7, 8, 9, 10. — Diagrammes d'électrophorèse. Évolution des acides humiques de maturation (extrait pyrophosphate) en fonction du climat et du substratum.

d'humine héritée dans les sols sableux
d'humine évoluée dans les sols
argileux.

- Produits humiques alcalino-solubles inférieurs à 30 % de C. Acides humiques en proportion supérieure ou égale aux acides fulviques, dominance des acides humiques gris sur les acides humiques bruns (moins de 30 % du total).
- Acides humiques gris dédoublés en une partie très condensée non migrante et une partie migrante moins condensée intermédiaire avec les acides humiques bruns — rapport C/N de 15 à 19 corrélé au taux d'acides humiques gris et à leur degré de polymérisation.

Profondeur

- Diminution régulière du taux de

matière organique et d'acides humiques, dépolymérisation des acides humiques, augmentation relative du taux d'acides fulviques surtout en saison des pluies.

(c) *Savane soudanienne*

Climat très contrasté. Saison sèche largement dominante sur la saison humide (pluviométrie inférieure à 1 000 mm).

Humus influencé par la végétation graminéenne et l'importance de la saison sèche. Faible teneur globale en matière organique. Humification directe de courte durée; condensation des acides humiques, puis déshydratation.

Maintien de débris végétaux, peu décomposés dans les sols sableux; peu de produits solubles.

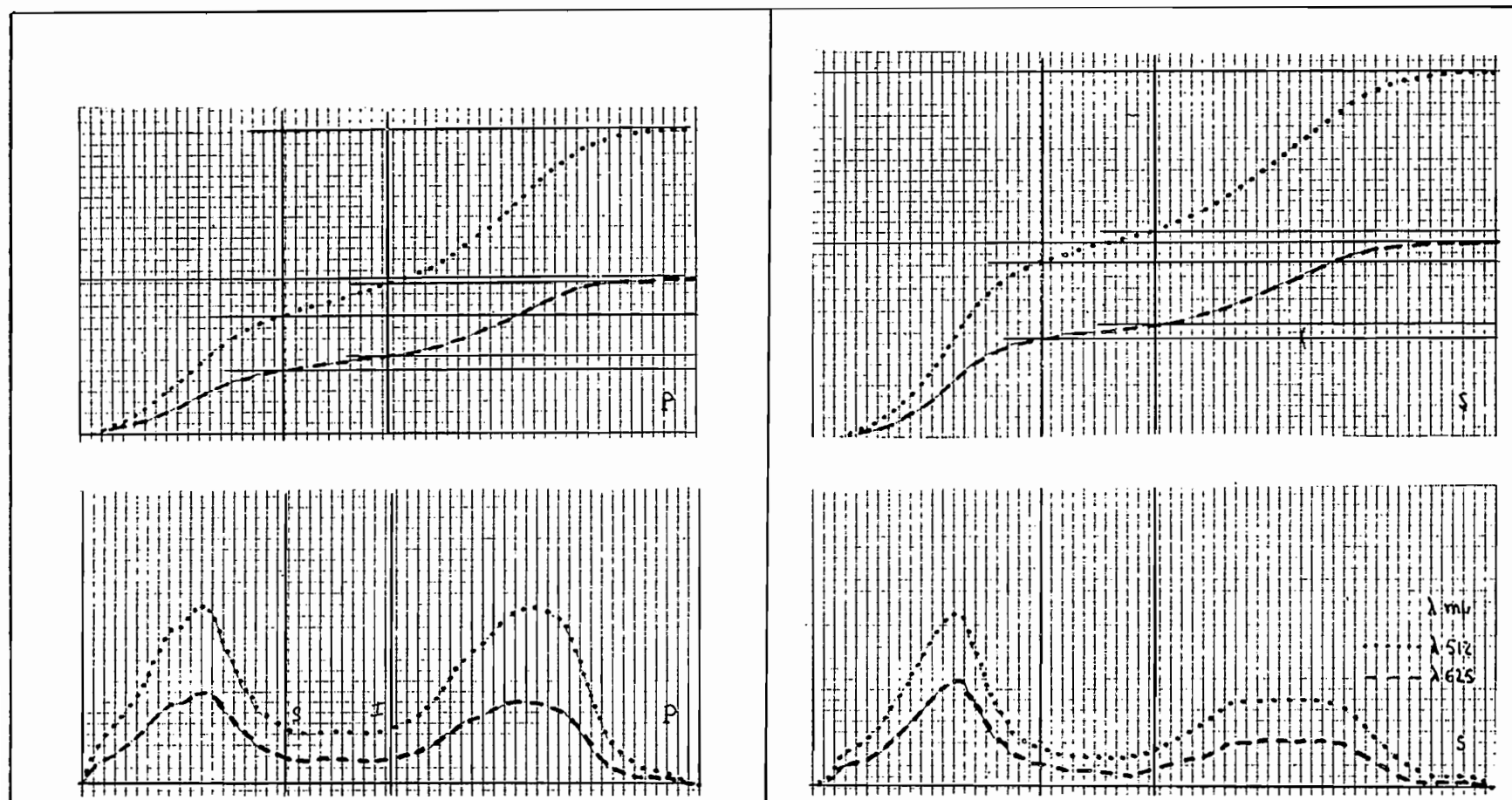


Fig. 11. — Type de sol : sol lessivé tropical sur calcaire (oxitropudalf). (P : extrait pyrophosphate ; S : extrait soude).

SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX PEU LESSIVÉS (tabl. II, fig. 8)

Surface

- Un peu de litière en surface. Nombreux débris végétaux dans l'horizon supérieur sableux.
- Humine très forte, supérieure à 70 %, à forte majorité d'humine héritée.
- Matières humiques alcalino-solubles peu abondantes (inférieures à 20 % C).
- Acides humiques gris très largement dominants sur les acides humiques bruns (inférieurs à 20 % AH). Fort degré de condensation des acides humiques gris (fraction non migrante unique).
- Proportion d'acides humiques gris et degré de condensation corrélés à la proportion de débris végétaux.
- Acides fulviques en faible proportion, moins de la moitié des acides humiques.

Profondeur

- Diminution progressive du taux de matière organique. Humine évoluée en proportion équivalente à l'humine héritée. Acides humiques fortement condensés, acides fulviques un peu plus abondants qu'en surface.

6. ESSAI D'INTERPRÉTATION

1. *Les humus formés sous climat humide* se caractérisent par l'apport important de résidus végétaux au sol; ces résidus se transforment rapidement, et donnent dans un premier stade de l'humine héritée fortement fixée sur l'argile, en particulier dans les couches supérieures du sol (tabl. I).

Dans un milieu constamment chaud et humide, généralement acide et normalement drainé, la ligninolyse est intense, ce qui donne, d'une part, des produits phénoliques solubles dont une partie fournit les *acides fulviques* libres susceptibles de migrer et de complexer les métaux; d'autre part, une autre fraction évolue simultanément vers des composés humiques de condensation, de poids moléculaire élevé, ce sont les *acides humiques gris* encore faiblement oxydés et solubles dans la soude. C'est ce que nous appelons humification directe ou rapide, par opposition à l'humification lente ou indirecte, qui donne en premier lieu des acides humiques de faible poids moléculaire (acides humiques bruns) (tabl. I).

Ces acides humiques gris de condensation que l'on dose en quantité relativement importante dans les couches supérieures du sol, se forment et se conservent en majorité dans l'horizon A₁ du podzol tropical (fig. 1). Ces acides humiques subissent des actions de maturation et d'oxydation qui sont plus ou moins poussées suivant les conditions de milieu. Les acides humiques de maturation et d'oxydation, solubles

dans le pyrophosphate de soude, se fixent sur les cations de l'argile pour former le complexe argilo-humique, mais sont diversement stabilisés selon les sols.

Dans le podzol sableux et pauvre en métaux, la stabilisation est médiocre en surface, mais se produit en profondeur dans l'aliot (fig. 2); par contre, dans le sol ferrallitique humifère (fig. 3 et 4), la stabilisation des acides humiques de maturation est maximum sur l'argile relativement riche en aluminium échangeable, d'où la dominance en surface et en profondeur d'acides humiques fortement polymérisés de l'extrait pyrophosphate. Dans le sol ferrallitique typique (fig. 5), il n'y a pas de stabilisation, l'oxydation des acides de maturation se poursuit jusqu'au stade acides humiques bruns, et même acides fulviques liés; cette oxydation conduit donc à une forte dépolymérisation.

En ce qui concerne les acides fulviques, ils sont formés en abondance dans les trois sols, à partir des produits solubles; dans le podzol, la biodégradation est ralentie en raison de l'acidité, de la pauvreté chimique du sol et d'une partielle hydromorphie; il y a migration maximum en profondeur, avec précipitation dans un aliot (fig. 2, tabl. II et III).

Dans le sol ferrallitique humifère, il y a également stabilisation des acides fulviques, mais ceux-ci ne migrent que partiellement et se fixent sur l'argile; ils sont dominants en profondeur et en proportion double de la surface (tabl. II et III).

Dans le sol ferrallitique typique, il y a également migration des acides fulviques, mais ces derniers sont rapidement dégradés au fur et à mesure qu'ils pénètrent; cependant, la dépolymérisation des acides humiques donne également des acides fulviques, et conduit à une dominance importante en surface, et plus encore en profondeur, des acides fulviques sur les acides humiques (tabl. II).

2. *Dans les climats plus secs à saisons alternées*, les sols reçoivent des quantités moindres de résidus végétaux, qui sont à dominance graminéenne, et ils sont soumis pendant la période humide et chaude à des processus d'humification directe, comparables à ceux décrits précédemment.

Suivant les régions, les acides humiques formés sont soumis à des processus de dessiccation plus ou moins précoces, qui donnent dans le sol des molécules fortement condensées et stabilisées par la déshydratation.

Lorsque l'humidité du sol se maintient plus longtemps, une partie des acides humiques est soumise à des processus d'oxydation et de dépolymérisation qui conduisent à la formation d'acides humiques gris migrant partiellement à l'électrophorèse, mais qui sont insuffisamment poussés pour

aboutir à la formation d'acides humiques bruns comme dans les régions humides; on a ainsi dans les climats intermédiaires des acides humiques gris présentant un double pic à l'électrophorèse (fig. 7) comme l'a signalé H. LEROUX (1980), alors que dans les climats particulièrement humides, on observe seulement une tache unique d'acide humique très condensé (fig. 6).

Dans les régions sèches, la proportion d'acides humiques gris et leur degré de condensation, ainsi que la valeur du rapport C/N, sont liés à la richesse relative en débris végétaux non décomposés qui augmentent dans les sols sableux. Il y a donc une limitation de la décomposition organique due à la sécheresse. Les acides fulviques sont en faible quantité, mais ils peuvent se former et migrer durant la saison des pluies, favorisant certains phénomènes de lessivage dans les climats à saisons alternées équilibrées (tabl. II).

La limitation de la décomposition organique conduit à un appauvrissement global de matière humique surtout dans les sols sableux.

Conclusion

Nous avons choisi de donner quelques exemples représentatifs de types d'horizons organiques que l'on rencontre dans les sols normalement drainés des régions tropicales humides ou à climat contrasté; nous avons montré, comme l'ont fait un certain nombre d'auteurs cités en référence, qu'il existe une relation entre le type de sol et la répartition des fractions de la matière organique, selon la méthode décrite dans cette note.

Les séparations physiques ou chimiques par des solvants variables, qui définissent certaines propriétés au point de vue fixation sur le composé minéral, sont complétées par des déterminations qualitatives (électrophorèse), fonction du degré de condensation des molécules humiques et de leur charge, la nature chimique réelle de ces molécules étant plus ou moins connue par les études réalisées dans des laboratoires spécialisés.

Il apparaît que la décomposition des matières végétales est toujours très importante en milieu bien drainé, même acide; seul l'accroissement de la saison sèche augmente le taux de matière non décomposée, mais provoque en même temps une forte diminution du taux de carbone total.

L'accroissement de ce taux de carbone dans les régions relativement humides semble lié au maintien dans le sol d'une grande quantité d'acides humiques

alcalino-solubles à fort degré de condensation. Ces molécules semblent se former assez précocement au cours des phénomènes d'humification, et elles sont ensuite plus ou moins rapidement dégradées suivant les sols, en molécules moins condensées; cette dégradation amène la disparition de l'humus, en particulier en profondeur.

L'augmentation du taux de matière organique dans les sols tropicaux dépend donc d'une part des conditions d'apport de végétaux, et de l'humification plus ou moins favorable, et ensuite de la résistance plus ou moins grande des produits humiques formés aux agents de dégradation.

Dans les climats humides à forte humification, il faut accroître les apports de matière végétale, et si possible diminuer la biodégradation en évitant l'érosion. Dans les climats secs au contraire, il faut favoriser l'humification en allongeant la durée de la période humide du sol pendant laquelle la matière organique se transforme, et compléter les apports organiques par des engrais minéraux, en particulier azotés.

Au point de vue de l'application pratique, TURENNE (1977-1980) aux Antilles, a démontré que les produits fortement condensés qui se forment au cours de l'humification sont riches en azote α -aminé, et agissent très favorablement sur la structure du sol. Par la suite, lors de la mise en culture, le taux d'agrégats diminue rapidement en même temps que le taux de N α -aminé: il y a passage à d'autres formes de N total qui diminue moins rapidement (N amide-N non hydrolysable).

Dans les sols des régions plus sèches au Sénégal, l'étude de l'humification des résidus, indispensables au maintien de la fertilité, a conduit C. FELLER (1977-1980) à mettre au point une méthode physique de fractionnement des matières organiques à des degrés d'humification variable: avec un compartiment d'entrée de matières végétales figurées, un compartiment de stockage à court terme, en cours d'humification, et un compartiment de réserves, qui sont les matières humifiées; ces compartiments correspondent à des diamètres de tamisage après agitation dans l'eau: supérieur à 0,2 mm, entre 0,2 et 0,05 mm et inférieur à 0,05 mm. Ces fractions sont analysées du point de vue chimique, biochimique, biologique, et même isotopique avec l'emploi de ^{14}C et ^{15}N . Ces études sur l'amélioration du stock organique sont encore en cours, mais l'intensité d'humification est un facteur essentiel de la fertilité des sols des régions sèches, et la voie résiduelle d'humification (humification directe) est prépondérante.

ANNEXES

Quelques limites d'interprétation concernant la méthode de fractionnement utilisée

	Très fort	Fort	Moyen	Faible	Très faible
Carbone total C ‰	> 50 ‰	25 à 50 ‰	10 à 25 ‰	5 à 10 ‰	moins de 5 ‰
<i>Fractions humiques en valeur relative du Carbone total</i>					
Humine totale	> 75 %	60-75 %	45-60 %	moins de 45 %	
Acides humiques et fulviques (5 fractions)	<i>Pourcentage relatif du carbone de chaque fraction</i>				
	≥ 20 %	10-20 %	5-10 %	2,5 à 5 %	moins de 2,5 %
Matières végétales légères		> 10 %	5-10 %	2,5 à 5 %	moins de 2,5 %

BIBLIOGRAPHIE

- BOISSEZON (De P.), MOUREAUX (C.), BOQUEL (G.) et BACHELIER (G.), 1973. — Les Sols ferrallitiques. Tome IV. La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques. O.R.S.T.O.M., *Initiation/Documentation — Technique n° 21*, Paris, 1973.
- DABIN (B.), 1971. — Étude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol. *Sc. du Sol n° 1* : 47-63.
- DABIN (B.), 1976. — Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du Sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XIV, n° 4, 1976.
- DABIN (B.) et THOMANN (C.), 1970. — Étude comparative de deux méthodes de fractionnement des composés humiques (Méthode TIURIN et méthode électrophorétique.) O.R.S.T.O.M., 1970. *Initiation/Documentation Technique n° 16*.
- DUCHAUFOR et JACQUIN, 1963. — Recherches d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlés par électrophorèse. *Ann. Agron.* 19 (6), 1963.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1977. — Pédologie. T. I, Masson.
- DEKADJEVI (A.), 1974. — Contribution à la dégradation physico-chimique et chimique des Terres de Barre sous culture au Togo. Thèse, Paris VI, O.R.S.T.O.M., 1974.
- FELLER (C.), 1979. — Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux à textures grossières très pauvres en humus. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4, 1979.
- FLEXOR (J. M.) et VOLKOFF (B.), 1977. — Distribution de l'isotope stable C13 dans la matière organique d'un sol ferrallitique de l'État de Bahia (Brésil). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 284 (D) : 1655-1657.
- FLAIG (W.), 1970. — Contribution à la connaissance de la constitution et de la synthèse des acides humiques. *Sci. du Sol n° 2*, 1970.
- LEROUX (H.), 1980. — Contribution à l'étude de la matière organique des sols sous forêts claires (savanes) de Côte d'Ivoire, en fonction des principaux facteurs naturels de pédogenèse. Thèse. Fac. d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 1980, *multigr.* Abidjan.
- NEYROUD (Y. A.) et SCHNITZER (M.), 1976. — Sur la structure des acides humiques et fulviques du sol. *Colloque International sur les études concernant les matières organiques des sols*. Brunswick R.F.A., sept. 1976.
- NEGARESTAN (A.), 1970. — Contribution à l'étude comparative de la matière organique dans quelques sols isohumiques ou à tendance isohumique d'Iran, du Maroc, du Niger, de Tunisie. Thèse Fac. des Sci. de Paris, 1970.

- PERRAUD (A.), 1971. — La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire. Thèse, Univ. de Naney (1971), O.R.S.T.O.M., Paris, 1971.
- SOURABIÉ, nov. 1979. — Influence de la culture de la canne à sucre sur les sols de Beregadougou (Haute-Volta). Cas particulier des facteurs de fertilité liés à la matière organique. Thèse (3^e cycle). Fac. Aix-Marseille, *multigr.* O.R.S.T.O.M., 1979.
- TURENNE (J.-F.), 1975. — Modes d'humification et de différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse Sc. Nat. O.R.S.T.O.M., Paris : 185 p. Mémoires O.R.S.T.O.M., n° 0-4.
- TURENNE (J.-F.), 1977. — Matière organique et stabilité structurale en vertisols irrigués. Organisation du système humique. XIV^e Meeting Caribbean Food Crops Society, Guadeloupe-Martinique.
- VOLKOFF (B.) et ANDRADE (M.-J.), 1976. — Caracterização da matéria orgânica de alguns solos ferralíticos do Estado da Bahia. Aplicação de um método de fracionamento das substâncias húmicas. *Comp. Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, 1975. *Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo*, 1976.
- VOLKOFF (B.), FLEXOR (J. M.) *et al.*, 1978. — Natureza do Humus nos latossolos destróicos da Baba. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 1978.
- VOLKOFF (B.), 1977. — La matière organique des sols ferrallitiques du Nord-Est du Brésil. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, 1977.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.), 1978. — Quelques propriétés de l'humus d'un sol ferrallitique humifère sur granite du Parana (Brésil). *Sci. du Sol* n° 4, 1978.
- VOLKOFF (B.), MELFI (A. J.) et CERRI (C.), 1979. — Les sols sur roches cristallines formés sous climat sub-tropical humide au Brésil. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 3, 1979.
- VOLKOFF (B.) et CERRI (C.), 1980. — Comparação de um humus de um Solontchak, um rendzina et um solo litólico da Região semi-árida do Rio Grande-do-Norte. *Revista Brasileira de Ciencia do solo* : 49-56.
- ROOSE (E.) *et al.*, 1970. — Érosion, ruissellement et lessivage oblique dans une plantation d'hévéas de basse Côte d'Ivoire, O.R.S.T.O.M., I.R.C.A., 115 p. *multigraphies*.
- DELHOUME (J.-P.), BOTTNER (P.), 1980 (non diffusé). — Premiers résultats concernant l'évolution de la matière organique en milieu méditerranéen semi-aride ; à l'aide de matériel végétal uniformément marqué au C14 et N15.
- POUGET (J.), 1980. — Les relations sol végétation dans les steppes sud-Algérois. Thèse de Doctorat.

Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique

Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle

Georges PEDRO et André-Bernard DELMAS

Station de Science du Sol, C.N.R.A., 78000 Versailles

RÉSUMÉ

La mise au point présentée sera essentiellement consacrée aux aspects actuels de l'« altération hydrolytique ». En effet, si l'hydolyse des minéraux et des roches a fait l'objet de nombreux travaux, elle a été étudiée jusqu'alors :

- de manière globale, et sans se préoccuper du « système » au sein duquel elle se poursuivait ;*
- en considérant les réactions à l'équilibre thermodynamique ;*
- en présence d'eau « libre » à la pression atmosphérique et mise en mouvement par l'intermédiaire des phénomènes de convection.*

Actuellement, un effort est sans conteste fait pour saisir les phénomènes de manière plus détaillée en considérant avant tout les horizons d'altérations comme des milieux hétérogènes. C'est pourquoi l'évolution peut être produite suivant les milieux ou les sites considérés (microsystèmes) :

- en présence de contraintes hydriques plus élevées, c'est-à-dire dans des milieux où l'activité de l'eau est inférieure à 1 ;*
- en mettant en jeu d'autres processus que la convection : diffusion par exemple ;*
- et en prenant en compte un certain nombre de systèmes en équilibre métastable.*

C'est donc dans cette dernière optique que les phénomènes d'altération seront plus spécialement abordés au cours du présent travail.

ABSTRACT

CURRENT ASPECTS OF THE PHENOMENA OF HYDROLYTIC WEATHERING. THEIR NATURE, DIVERSITY AND LOCATION DURING THE SURFACE CHEMICAL EVOLUTION.

The current aspects of the « hydrolytic weathering » will be the main subject of this survey. As a matter of fact, if the mineral and rock hydrolysis was dealt with in numerous works, it was studied until now :

- as a whole and without attending to the « system » where it developed ;*
- by considering the reactions to the thermodynamic equilibrium ;*
- in the presence of « free water » under atmospheric pressure and it was started through phenomena of convection.*

Currently, an attempt is unquestionably made in order to come to a more detailed understanding of the phenomena

by considering mainly the weathering horizons as heterogeneous environments. Therefore, the evolution can occur according to the environments or sites under consideration (microsystems) :

— in the presence of more important hydrous requirements, that is to say in environments where the action of water is lower than 1 ;

— by using other processes than convection such as diffusion, for instance ;

— and by taking account of a certain number of systems subject to a metastable equilibrium.

Therefore, in the present work, weathering phenomena will be more particularly dealt with from this last point of view.

Introduction

L'œuvre pédologique de G. AUBERT en zone tropicale a été dès le début fortement marquée par l'aspect géochimique et cristallochimique des phénomènes d'altération superficielle, plus spécialement lorsque ceux-ci résultent de l'action des eaux météoriques (hydrolyse). Il ne faut d'ailleurs pas s'en étonner lorsque l'on sait qu'en préparant en 1941 sa monographie sur *les sols de la France d'Outre-mer*, G. AUBERT avait dû s'initier aux recherches fondamentales effectuées dans ce domaine par divers minéralogistes, et en particulier par A. LACROIX, H. HARRASSOWITZ et J. B. HARRISON. D'où l'importance prise par la nature des minéraux argileux et, ce faisant, par la valeur du rapport moléculaire $K_i = \text{SiO}_2/\text{A}_2\text{O}_3$ déterminé à partir de l'analyse triacide, dans les premières caractérisations et classifications des sols des régions tropicales (cf. par exemple G. AUBERT, 1954 ; G. AUBERT et Ph. DUCHAUFOR, 1956 ; G. AUBERT, 1964...).

Depuis cette époque, à la suite de divers travaux expérimentaux (G. PEDRO, 1964 ; J. TRICHET, 1969 ; M. ROBERT, 1970 ; A. HERBILLON, 1974 ; A. B. DELMAS, 1979) ou d'études théoriques (R. M. GARRELS et P. HOWARD, 1957 ; H. C. HELGESON, 1968-1969 ; Y. TARDY, 1969 ; G. MICHARD et C. FOUILLAC, 1974 ; B. FRITZ, 1975 ; G. SARAZIN, 1979) la connaissance des phénomènes d'altération a fait de grands progrès. Ainsi, au moins si l'on appréhende les choses d'une manière *globale*, peut-on aujourd'hui interpréter convenablement les processus d'altération, et ce :

— en se référant à la chimie des solutions aqueuses *diluées*, c'est-à-dire ayant une grande « réserve » en molécule H_2O dont l'activité est de ce fait égale à 1 ;

— en estimant d'un autre côté que les réactions enregistrées peuvent être assimilées à des réactions d'équilibre justiciables de l'application de la loi d'action de masse et des données de la thermodynamique ;

— en admettant que le mouvement des ions et éléments solubles extraits lors de l'altération ne pose pas de problèmes, c'est-à-dire en supposant que

celui-ci résulte d'un mouvement de *convection* affectant la phase aqueuse (percolation) ;

— enfin, sans se préoccuper outre mesure de la « géométrie » du milieu en voie d'évolution.

Sur ces bases, et notamment grâce à l'utilisation de méthodes de simulation, a été développée une série d'études quantitatives, dans lesquelles les minéraux secondaires caractéristiques de l'altération sont tous des constituants de *néoformation* résultant de réactions de *précipitation* à l'équilibre et correspondant en fait aux milieux les plus *ouverts* des systèmes envisagés.

En réalité, dès qu'on se réfère à des études fines réalisées en milieu naturel (cf. par exemple N. LENEUF, 1959 ; M. BONIFAS, 1959 ; J. DELVIGNE, 1965 ; J. J. TRESCASES, 1973 ; J. M. WACKERMANN, 1975 ; A. MEUNIER, 1977 ; R. M. GARDNER *et al.*, 1978 ; J. C. PION, 1979 ; A. BLOT, 1980), on se rend compte que les phénomènes d'altération sont beaucoup plus complexes que ceux découlant des modèles, tant expérimentaux que théoriques. Dans cette optique, on peut se contenter à ce stade de faire les deux remarques ci-après :

— les minéraux résultant de l'altération des roches primaires ne sont pas toujours des minéraux de néoformation. Beaucoup de constituants des sols proviennent d'une évolution progressive par rajustement des réseaux tels les minéraux de *transformation*, ce qui prouve qu'il existe aussi dans les niveaux de surface des systèmes *hors d'équilibre* ou des constituants en équilibre *métastable* ;

— le milieu en voie d'altération n'est pas homogène, mais souvent très *hétérogène* du point de vue géométrique.

Dans ces conditions, si l'on veut appréhender correctement les phénomènes d'altération, il semble indispensable aujourd'hui de prendre en compte :

— non seulement la nature des processus, mais leur localisation ;

— non seulement les réactions en solution, mais les phénomènes qui se produisent aux *interfaces* ;

— non seulement les milieux dilués, mais les processus caractéristiques de milieux plus concentrés;

— non seulement les évolutions consécutives au mouvement de convection de la phase aqueuse, mais encore les phénomènes où les mouvements des ions résultent de l'existence de gradients (chimique, thermique...);

— non seulement enfin des systèmes *très hydratés* (donc dilués) mais aussi des systèmes *peu hydratés* ou encore *déficillaires en eau* (1).

En définitive, si la référence aux données minéralogiques globales et à la composition des solutions aqueuses diluées conduit à des résultats satisfaisants lorsque l'on veut indiquer les grandes tendances zonales de l'évolution (G. PEDRO, 1966-1978; G. PEDRO et G. SIFFERMANN, 1979; Y. TARDY, 1969), celle-ci ne permet pas de prévoir le détail des phénomènes enregistrés au cours de l'altération en un point déterminé de la surface du globe.

C'est ce qui nous a conduit à réaliser cette mise au point consacrée aux aspects actuels des phénomènes d'altération hydrolytique envisagés plus spécialement dans leur rapport avec les processus pédologiques, et à la dédier à G. AUBERT.

1. HÉTÉROGÉNÉITÉ GÉOMÉTRIQUE DES MILIEUX D'ALTÉRATION. SES CONSÉQUENCES

1.1. Description raisonnée de l'hétérogénéité. Nécessité d'une nomenclature adéquate

Les moyens techniques mis en œuvre ces dernières années, ont beaucoup contribué à faire prendre conscience de ces problèmes, en permettant des examens précis d'échantillons naturels, *non perturbés* et même hydratés : microscopie optique (lame d'épaisseur $\approx 30 \mu$); microscopie électronique à transmission après amincissement ionique (lame d'épaisseur de l'ordre de 500 Å; cf. L. M. BRESSON, 1980); microscopie électronique à balayage (MEB). De ce fait, on est à même de *visualiser* les phénomènes jusqu'à un niveau très fin, c'est-à-dire jusqu'aux « microsystèmes », et aussi dans un certain nombre de cas, de procéder à des analyses *ponctuelles* grâce à l'utilisation de la microsonde ou de l'ESCA (ou XPS) (cf. R. PETROVIC *et al*, 1976; J. H. THOMASSIN, 1977).

Mais pour se repérer, il a fallu adopter une nomenclature. On connaît celle de R. BREWER (1964) pour les sols ou, en ce qui concerne plus

spécialement le « weathering », les recommandations du Working group of Soil Micromorphology (G. STOOPS, E. B. A. BİSDOM, J. DELVIGNE, E. FITZPATRICK, G. PANÈQUE, 1978; J. DELVIGNE, E. B. A. BİSDOM, J. SLEEMAN et G. STOOPS, 1979) relatives à la description des faciès et des degrés d'altération.

En ce qui concerne les mécanismes ponctuels de l'évolution d'une roche, et surtout leur succession au cours des transformations superficielles, la nomenclature la plus adaptée paraît aujourd'hui celle proposée par Ph. ILDEFONSE *et al* (1979) et qui résulte des travaux d'A. MEUNIER et B. VELDE (1976), D. PROUST (1976), A. MEUNIER (1977) et Ph. ILDEFONSE (1978).

A l'heure actuelle, il est permis de reconnaître 3 grands types de milieux dans une roche en voie d'évolution (fig. 1) :

(a) LES MICROSYSTÈMES DE CONTACT, qui agissent dans les tout premiers stades de l'altération lorsque les minéraux primaires sont encore jointifs.

(b) LES MICROSYSTÈMES PLASMIQUES qui interviennent lorsque la roche devient friable et que les minéraux endogènes se dégradent en donnant un plasma argileux. On distingue dans ce type 3 stades :

— les *surfaces de destabilisation* des minéraux le long des fissures, clivages et cassures;

— le *plasma primaire* qui se développe au sein d'un minéral primaire dont il respecte le volume;

— enfin, le *plasma secondaire* qui résulte d'une redistribution du plasma primaire au fur et à mesure de la progression de l'altération de la roche et de la réorganisation qui en résulte.

(c) Enfin, le *système fissural*, qui apparaît lorsque la roche est entièrement altérée avec élargissement généralisé des fissures, pores et chenaux, au sein desquels les eaux circulent très vite.

Une telle nomenclature paraît aujourd'hui fort intéressante dans la mesure où elle semble tout à fait adaptée à la connaissance des mécanismes de l'altération en fonction des caractéristiques physiques du milieu en voie d'évolution et notamment du développement de la porosité.

1.2. Conséquences générales de cette hétérogénéité. Aspect physique et physicochimique

Les niveaux d'altération sont donc des milieux plus ou moins *meubles* et hétérogènes granulo-

(1) Dans le métamorphisme aussi, la grille classique relative aux milieux excédentaires en eau (WINKLER, 1965) ne suffit pas à tout expliquer (cf. J. TOURET, 1980).

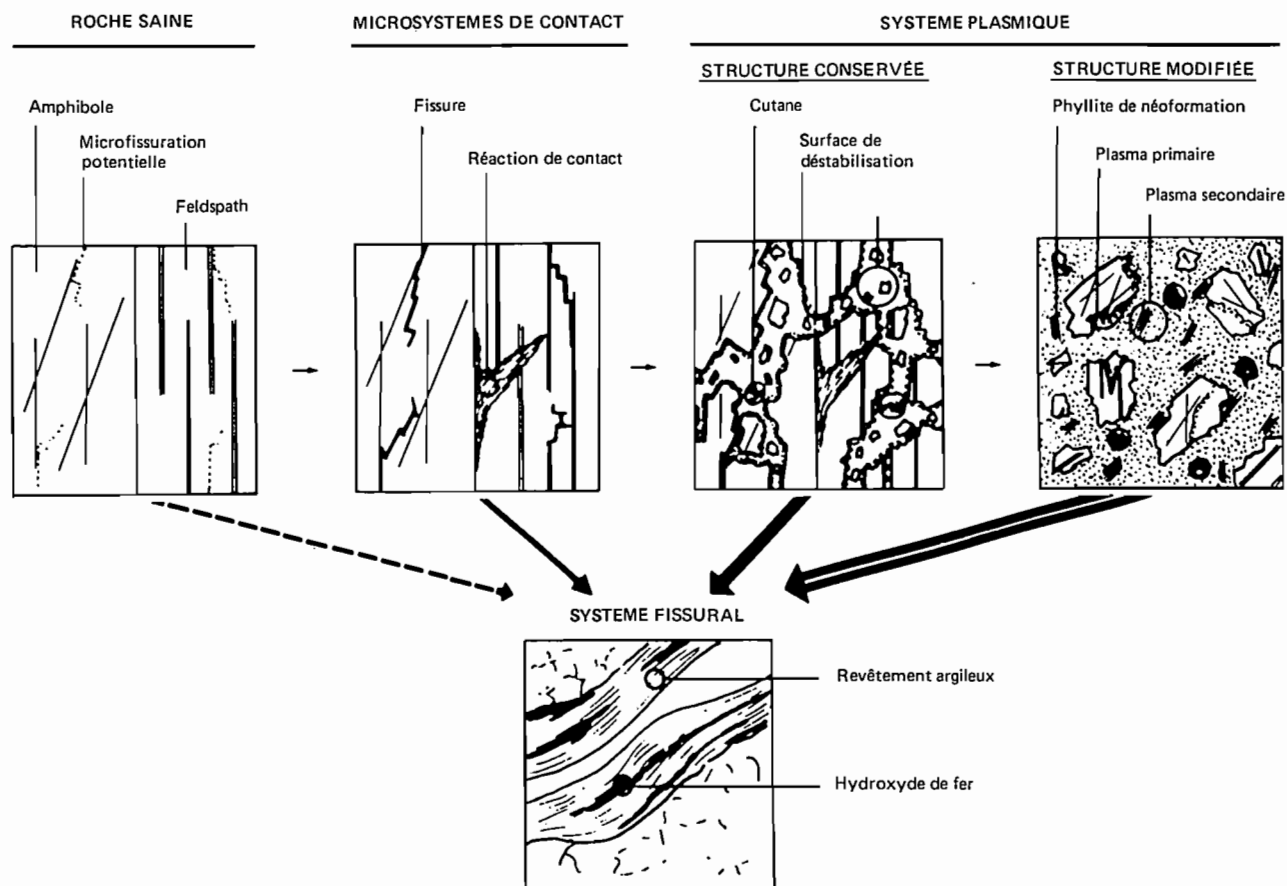


Fig. 1. — Les modalités de l'altération d'une roche cristalline dans les conditions superficielles.

métriquement. Dans ces conditions, si l'on veut appréhender la réactivité de tels systèmes vis-à-vis de la phase aqueuse qui est en fait le moteur de l'évolution, il est bon de se référer aux courbes classiques : ψ (potentiel de l'eau) — θ (teneur en eau) ou encore $pF = -\log_{10} \psi(1) - \theta$ (fig. 2), qui montrent que l'eau contenue dans un matériau est d'autant plus retenue à la surface des solides qu'elle est en plus faible quantité. D'autre part, en application de la loi de Kelvin, il est possible de relier le pF à la tension superficielle et de calculer ainsi la dimension des pores correspondant (rayon équivalent) (2); ce qui montre que plus l'eau est en faible quantité, plus elle tend à se localiser dans les pores les plus fins du milieu.

A côté de cette caractérisation de l'état de l'eau au niveau des contraintes, il faut en même temps se préoccuper de sa *mobilité*. A ce sujet, on commence à disposer aujourd'hui de quelques données concernant la valeur du coefficient de conductivité en fonction de θ (ou de ψ) (fig. 3). Or, l'examen de ces courbes montre que la mobilité de l'eau décroît rapidement dès que celle-ci se trouve dans des pores fins; la diffusivité prend alors le relais; elle se fait en phase liquide tant que le film d'eau est continu, mais ne peut s'effectuer qu'en phase vapeur aux faibles hydratations qui vont d'ailleurs de pair avec l'existence d'un film discontinu. De ce fait, si le mouvement des ions extraits par l'altération se propage avant tout par convection au sein du

(1) ψ est exprimé par une hauteur d'eau en cm = $-h$.

(2) Le calcul est fait ici pour un modèle de pores en coins.

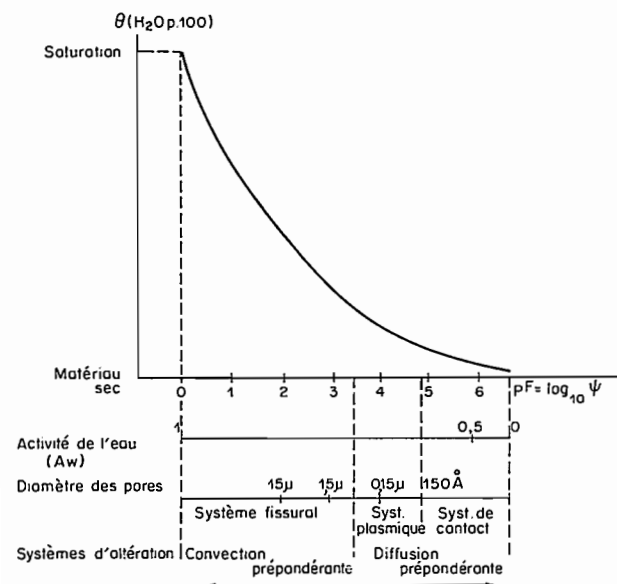


Fig. 2. — Courbe schématique θ (teneur en eau %) — pF d'un matériau meuble avec indications complémentaires concernant l'activité de l'eau, le diamètre des pores et la nature des systèmes d'altération mis en cause.

système fissural, les phénomènes liés à la diffusion chimique apparaissent, puis prennent le pas dans les autres milieux : systèmes plasmiques et surtout système de contact (cf. fig. 1). Il faut donc donner maintenant quelques indications complémentaires sur le développement des processus d'altération dans ces deux derniers systèmes, c'est-à-dire en milieu non ou peu convectif.

1.3. Réalité de l'altération superficielle dans les milieux non ou peu convectifs

(a) RÉACTIONS LOCALISÉES ET DÉLOCALISÉES. QUELQUES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Pour illustrer cet aspect des phénomènes, il est bon de rappeler brièvement une expérience réalisée il y a quelques années (cf. S. HÉNIN et G. PEDRO, 1979) dans laquelle des constituants minéraux solides étaient placés au contact d'une phase aqueuse libre, mais totalement immobile. La convection est donc entièrement absente dans ce cas, en sorte que s'il se produit des modifications chimiques, celles-ci ne peuvent résulter que de la migration des éléments concernés par simple diffusion.

Considérons 2 sacs à dialyse contenant des constituants solides minéraux différents A et B (fig. 4), dont les éléments sont susceptibles de réagir entre eux pour donner naissance à de nouvelles espèces; nous avons donc là une sorte de « modèle »

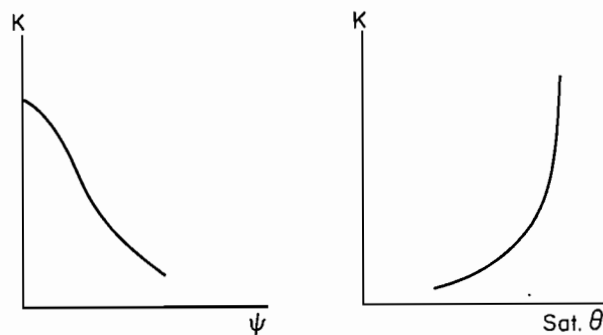


Fig. 3. — Variation du coefficient de la conductivité hydraulique K d'un sol en fonction de la teneur en eau θ (à droite) ou en fonction du potentiel matriciel ψ de l'eau (à gauche).

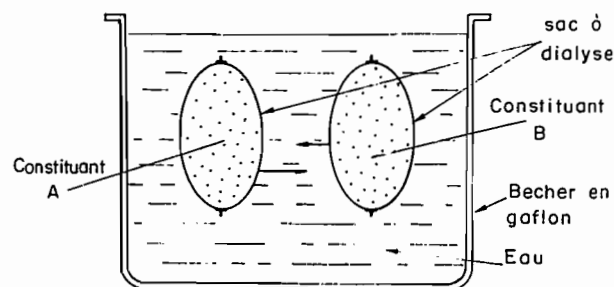


Fig. 4. — Schéma du dispositif expérimental.

représentatif d'un mélange de minéraux distincts comme cela existe dans la plupart des roches. On immerge alors ces sacs à dialyse remplis d'eau dans des récipients plastiques contenant eux-mêmes ce liquide et on les porte à l'étuve à 60 °C, sans leur faire subir d'agitation. Au bout de quelques temps (2 à 6 mois), on est amené à faire les observations suivantes :

1° Il ne se forme pas de précipité important en dehors des sacs à dialyse.

2° Les compositions des sacs A et B ont évolué, en sorte que des réactions se sont produites à l'intérieur des sacs et que des migrations d'éléments par simple diffusion se sont effectivement manifestées d'un sac à l'autre.

Dans le cas de l'un des systèmes étudiés : $\text{SiO}_2\text{-MgO}$, la silice était apportée dans le sac B sous forme de différents composés plus ou moins altérables : gels de silice frais ou desséchés, gels aluminosiliciques séparés ou mixtes, halloysite, montmorillonite, phlogopite. Quant au magnésium, il était disposé dans le sac A à l'état de carbonate hydraté ou de brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

TABLEAU I
Évolution dans le système
 SiO_2 - Al_2O_3 - MgO - CO_2

Taux de migration SiO_2 (%)	Sac A		Sac B		Taux de migration MgO (%)
	Minéral néoformé	Nature des minéraux de départ		Minéral néoformé	
↑	Gel SiO_2 - MgO	MgCO_3	Gel de silice	—	↓
	Phyllite 2/1	MgCO_3	Gel de silice déshydraté (110°C)	—	
	Phyllite 1/1	MgCO_3	Gel de silice chromatographié	—	
	Phyllite 2/1	MgCO_3	Gels séparés SiO_2 - Al_2O_3	Boehmite Gibbsite	
	Phyllite 2/1	MgCO_3	Gels mixtes SiO_2 - Al_2O_3	Hydrotalcite $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})$ $16\text{CO}_3, 4\text{H}_2\text{O}$	
	—	MgCO_3	Halloysite	Pseudochlorite	
	—	MgCO_3	Montmorillonite	Vermiculite	
	—	MgCO_3	Phlogopite		

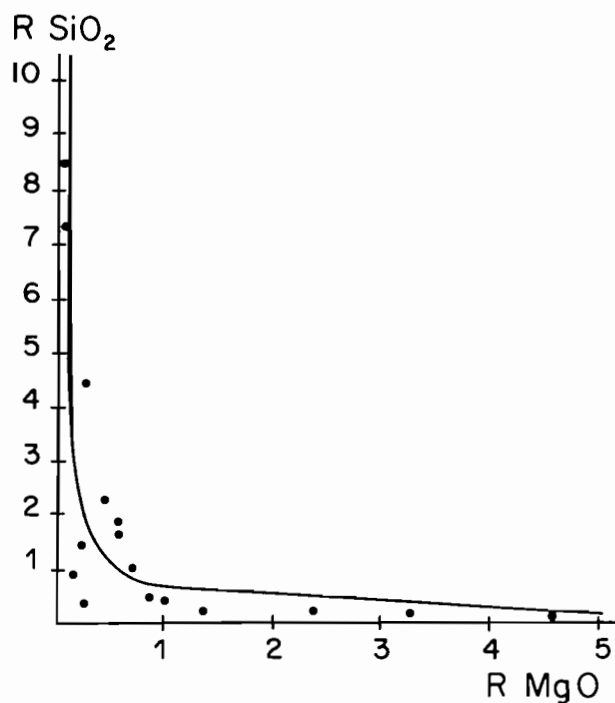


Fig. 5. — Relation entre le taux de migration de SiO_2 et celui de MgO au cours des essais (points expérimentaux et courbe d'ajustement).

A la fin des essais, l'analyse chimique et minéralogique a conduit à faire un certain nombre de constatations :

1° Les deux éléments ont pu migrer, mais toujours *différentiellement*; de ce fait, le taux de migration de la silice est d'autant plus important que celui de Mg est faible (et inversement); la courbe obtenue est de type *hyperbolique* (fig. 5).

2° Dans le compartiment A, il se forme des composés d'autant plus siliceux que la silice en B était plus labile; on obtient ainsi des gels silico-magnésiens, puis des phyllites 2/1 (tabl. I).

3° A l'opposé, dans le compartiment B, on voit apparaître des composés magnésiens qui correspondent à une néoformation, ou bien lorsque l'activité de la silice est faible (ce qui est le cas des phyllites), à des phénomènes de *transformation* avec apparition de vermiculites ou de pseudochlorites.

La conséquence essentielle de ces quelques résultats peut s'exprimer de la façon suivante : « *En milieu non ou peu convectif*, les évolutions minéralogiques qui sont susceptibles de se produire, se manifestent toujours au *voisinage immédiat* du constituant le moins soluble ou contenant l'élément le moins

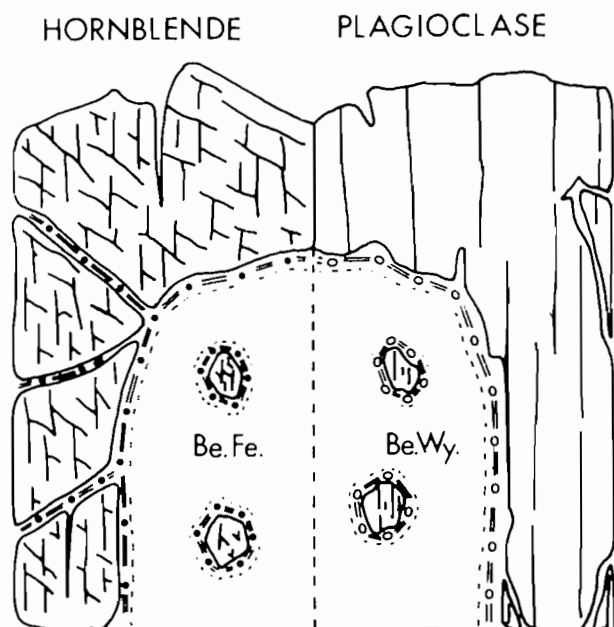


Fig. 6. — Localisation des différents minéraux argileux lors de l'altération des amphiboles et des plagioclases de l'amphibole de la Roche l'Abeille (D. PROUST et B. VELDE, 1978); leur composition : Be-Fe = Beidellite ferrifère; Be-W = Beidellite aluminuse de type Wyoming.

Altération Hornblende	$[\text{Si}_{3,42} \text{Al}_{0,58}] \text{O}_{10} [\text{Al}_{0,98} \text{Fe}^{2+}_{0,79} \text{Ti}_{0,02} \text{Mg}_{0,23}] (\text{OH})_2 \text{Ca}_{0,11} \text{Na}_{0,02} \text{K}_{0,03} \text{Mg}_{0,20}$
Altération Plagioclase	$[\text{Si}_{3,51} \text{Al}_{0,49}] \text{O}_{10} [\text{Al}_{1,35} \text{Fe}^{2+}_{0,34} \text{Ti}_{0,01} \text{Mg}_{0,20}] (\text{OH})_2 \text{Ca}_{0,10} \text{Na}_{0,14} \text{Mg}_{0,16}$

mobile, c'est-à-dire le plus inerte dans le sens de D. S. KORSHINSKII.

Ce sont donc les conditions physicochimiques particulières régnant au voisinage des constituants solides qui vont régler non seulement la nature des évolutions minéralogiques, mais encore le *site* où ceux-ci vont s'individualiser. On comprend ainsi le rôle que peut jouer l'hétérogénéité minéralogique du système dans le développement des phénomènes d'altération et de néoformation, rôle qui avait été pressenti il y a déjà longtemps par J. de LAPPARENT au sujet de la séricitisation des feldspaths et à propos duquel plus récemment on a été amené à concevoir la notion de « système d'agression » (S. HÉNIN *et al*, 1968) et à la définir en fonction de la « structure » du milieu.

Les résultats de l'étude de D. PROUST et B. VELDE (1968) sur l'altération des amphibolites en Haute-Vienne (France) en sont une illustration typique. L'amphibolite de la Roche l'Abeille est constituée essentiellement de plagioclase et de hornblende, qui se transforment *in situ* en smectites. Or, il a été constaté qu'au début de l'altération, la smectite

formée aux dépens et à la place de la hornblende était une beidellite ferrifère, alors que celle individualisée aux dépens du plagioclase est une beidellite aluminuse de type Wyoming (fig. 6).

Dans les deux cas, c'est donc bien l'élément le moins mobile du système qui a servi de support aux néoformations.

(b) CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES DE L'ALTÉRATION EN MILIEU NON OU PEU CONVECTIF

A partir des quelques résultats présentés ci-dessus, il devient possible maintenant de faire ressortir un certain nombre d'éléments relatifs plus précisément à cet aspect du problème.

— Tout d'abord, en milieu non ou peu convectif, les échanges chimiques se font essentiellement par *diffusion* au sein de la phase aqueuse, par suite de l'existence de *gradients de potentiels chimiques*. Ce mécanisme intervient d'ailleurs tant que la vitesse de mobilité du fluide reste inférieure ou voisine de la vitesse de la diffusion chimique; en revanche, il ne

joue plus aucun rôle, dès que le mouvement de convection (percolation) devient prédominant.

— Dans ce type d'altération apparemment statique et en système fermé, les évolutions minéralogiques sont tout à fait possibles. Elles ne résultent pas ici de l'agressivité des solutions à l'égard des roches en cours de percolation, mais de l'incompatibilité chimique entre deux milieux adjacents, entraînant des mobilités différentielles qui sont fonction de la nature des éléments considérés et de celle des minéraux en voie d'altération.

Or, il résulte de ces éléments plusieurs conséquences :

1° Lorsque les éléments extraits de minéraux primaires par diffusion ont une mobilité similaire, on obtient aisément des *néoformations*, alors que dès que les mobilités sont très différentes, l'évolution minéralogique ne peut se présenter que sous la forme de *transformations*, c'est-à-dire de processus dans lesquels les modifications de la constitution cristallochimique se font progressivement sans réorganisation structurale majeure. En fait, tous les intermédiaires sont possibles, ce qui explique la *variabilité* des minéraux secondaires individualisés au sein des niveaux d'altération (contrairement à l'altération par convection qui simplifie et uniformise).

2° D'un autre côté, apparaît dans toute son ampleur, l'importance de la plus ou moins grande vulnérabilité du minéral en voie d'altération, en valeur absolue et aussi par rapport à ses voisins; d'où l'intérêt d'une connaissance précise de la nature des mécanismes d'altération qui se situent aux interfaces : dissolution, extraction non congruente, existence de réactions secondaires... et de leur cinétique (cf. à ce sujet A. B. DELMAS, 1979).

1.4. Conclusions

A la lumière de ces diverses indications, il est donc clair que les conditions de l'altération ne peuvent être uniformes au sein d'une roche en voie d'évolution, qu'elles ne sont pas nécessairement les mêmes dans un système très hydraté ou dans un système faiblement hydraté, dans les gros pores (système fissural) ou dans les pores plus fins (systèmes plasmiques...). D'ailleurs les quelques données auxquelles on peut se référer à l'heure actuelle, montrent bien que la composition des eaux et leurs caractéristiques physico-chimiques dépendent de leur degré de rétention (pF), et de leur mobilité, c'est-à-dire de la dimension des pores dans lesquels elles se trouvent. Citons par exemple les résultats préliminaires de M. L. FERNANDES-MARCOS, F. MACIAS et F. GUITIAN-OJEA (1979) relatifs à l'altération des roches en Galice (Espagne) (fig. 7).

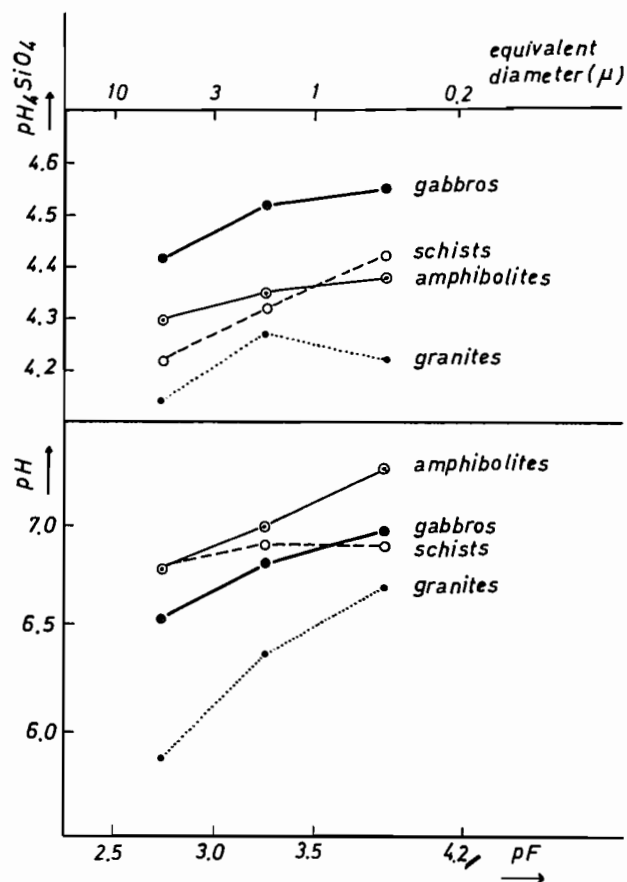


Fig. 7. — Variation du $pSi(OH)_4$ et du pH des sols en fonction du pF (M. L. FERNANDES-MARCOS *et al*, 1979).

Il nous faut donc envisager maintenant plus en détail les phénomènes d'altération en milieu très peu hydraté.

2. ASPECTS PARTICULIERS DE L'ALTÉRATION EN MILIEU FAIBLEMENT HYDRATÉ

Par milieu faiblement hydraté, il faut entendre des milieux non saturés du point de vue hydrique, ce qui correspond à ce qui se passe *grosso modo* au sein des microsystèmes plasmiques et de contact définis précédemment, et dans lesquels l'eau n'est pas « libre »; elle est en effet toujours sous contrainte, celle-ci pouvant être toutefois plus ou moins prononcée.

Dans ce domaine, deux aspects seulement sont à retenir :

— Le premier concerne l'état de l'eau, c'est-à-dire les problèmes en relation avec son activité et sa stabilité au sein de ces systèmes peu hydratés.

TABLEAU II

Relations entre le pF et l'activité de l'eau à 25° C

Tension équivalente (cm d'eau)	pF	Activité de l'eau aw	Diamètre des pores (1) (μm)
100	2	0,9999	15
1 000	3	0,9993	1,5
10 000	4	0,9929	0,15
16 000	4,2	0,9888	
100 000	5	0,9312	0,015
	5,52	0,7898	
10°	6	0,4903	0,0015
	6,2	0,3232	
	6,4	0,1669	
10°	7	0,0008	

(1) Évalué en se référant à un modèle de pores en coins.

TABLEAU III

Relations entre le pF, l'humidité relative à 25°C et le point de congélation

Tension équivalente (cm d'eau)	pF	Humidité relative (%)	Point de congélation (°C)
100	2	99,99	— 0,01°
1 000	3	99,93	— 0,08°
10 000	4	99,29	
16 000	4,2	98,88	— 1,1°
100 000	5	93,12	— 10°
	5,52	78,98	
10°	6	49,03	— 90°
	6,2	32,32	
	6,4	16,69	
10°	7	0,08	

— Le second a trait à sa faible *mobilité* et à la prépondérance, dans de telles conditions des phénomènes de diffusion chimique. Comme ce second aspect vient d'être examiné (§ 1.3), nous nous bornerons maintenant à évoquer le premier.

2.1. Activité et stabilité de l'eau au sein des systèmes peu hydratés (Ph. Low, 1951 ; G. H. Bolt et M. J. Frissel, 1960 ; G. Bourrie et G. Pedro, 1979)

La transformation d'une mole d'eau pure à la pression de référence (1 atmosphère) en une mole d'eau sous tension, met en jeu à température constante une variation d'enthalpie libre, qui dépend de la contrainte. Si l'on exprime celle-ci en pF, on a :

$$\Delta G = -10 \text{ pF} \cdot 2,75$$

Or, on sait depuis GIBBS que l'enthalpie libre molaire partielle n'est autre que le potentiel chimique ; dans ces conditions il suffit d'appliquer à l'eau la définition de l'activité donnée par LEWIS pour avoir la relation entre l'activité de l'eau et son potentiel matriciel, soit :

$$\psi = R T \ln a_w$$

En appliquant cette formule à 25 °C pour l'eau pure, on obtient les résultats numériques qui sont consignés dans le tableau II. On constate alors aisément que l'activité de l'eau peut être très variable suivant la taille des pores, donc selon les milieux concernés (cf. fig. 2) :

— Ainsi, dans les systèmes fissuraux, l'eau est « libre » et présente effectivement une activité égale à 1.

— Au sein des systèmes plasmiques, l'eau est plus ou moins « liée », mais l'activité reste très proche de 1.

— Enfin, dans les systèmes de contact à très faible hydratation, l'activité de l'eau diminue rapidement et atteint des valeurs si faibles que l'eau en tant que molécule H₂O devient même *instable* et qu'elle tend à se dissocier plus ou moins aisément en ions H⁺ et OH⁻.

Au sein du milieu naturel, de tels systèmes très peu hydratés ne sont pas aussi rares qu'on aurait pu le penser à première vue. Évidemment, ils sont caractéristiques des niveaux les plus *profonds* de la zone d'altération superficielle (cf. § 3). Mais même tout au contact de la biosphère, on peut les rencontrer dans les régions sèches ou très froides par exemple. Il suffit de rappeler ici les relations permettant d'évaluer la variation de l'activité de l'eau en fonction de la température de congélation (l'abaissement du point de congélation est : $\Delta T = \frac{RT_0^2}{L} \ln a_w$, L étant l'enthalpie de fusion-chaleur latente de la glace) et celle de l'humidité relative de l'air ($a_w = \frac{\text{H.R.} (\%)}{100}$).

Le tableau III rassemble à ce sujet quelques valeurs numériques, qui permettent de constater que :

— dès que l'humidité relative tombe au-dessous de 100 %, l'activité diminue et devient même inférieure à 0,5 en dessous d'une H.R. de 50 % ;

— de même, dès que la température descend au-dessous de 0° ; à partir d'une température de — 90 °C, l'activité devient également inférieure à 0,5.

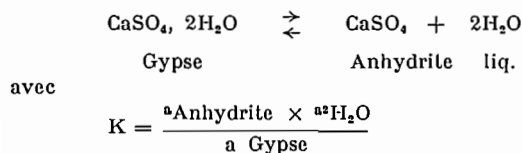
TABLEAU IV

*Variation de l'activité de l'eau en fonction de la température
pour la réaction gypse-anhydrite*

Température (°C)	Activité de l'eau
58°	1,000
55°	0,960
50°	0,915
45°	0,880
39°	0,845
35°	0,825
30°	0,800
23°	0,770
18°	0,750
12°	0,725

2.2. Importance de la prise en compte de l'activité de l'eau dans les systèmes d'altération peu hydratés

On sait depuis longtemps que l'activité de l'eau contrôle la stabilité de certains équilibres mettant en jeu des minéraux hydratés. Le cas du système anhydrite-gypse a été étudié par exemple par L. A. HARDIE (1967) :



Si nous nous trouvons dans des conditions standard (pression = 1 atm et $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, cela se simplifie en :

$$K = a_{H,0}^2$$

En revanche, si la température est constante (25 °C) mais que la pression varie, ou bien si on est à la pression atmosphérique et que la température évolue, la constante d'équilibre, donc l'activité de l'eau va alors varier (tabl. IV).

Naturellement, une telle action peut se manifester dans n'importe quel système d'altération. Si l'on prend comme exemple le cas classique étudié par R. M. GARRELS et P. HOWARD (1957) : feldspath-muscovite-kaolinite-gibbsite, il est possible d'envisager la modification du diagramme de stabilité en fonction de l'activité de l'eau. C'est ce qu'ont fait récemment S. V. MATTIGOD et J. A. KITTRICK (1980) qui ont abouti au schéma reproduit dans la figure 8 pour des activités allant de 1 à 0,5. On voit ainsi que l'activité de la silice correspondant à l'équilibre kaolinite-gibbsite diminue de plus de 5 fois, lorsque l'activité de l'eau décroît; or cela suggère que la kaolinite devient plus stable relativement à la

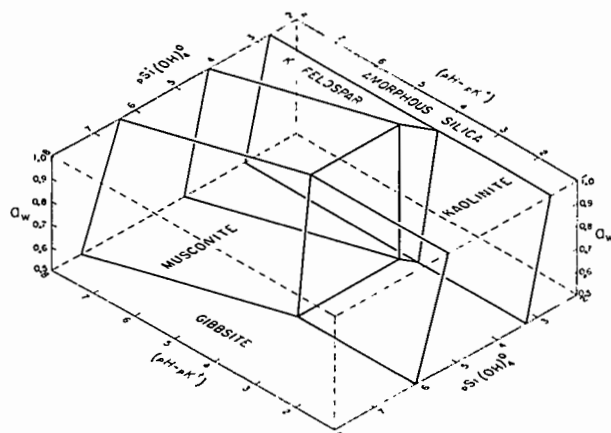
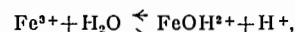


Fig. 8. — Diagramme du système $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ à 25°C et 1 atmosphère pour une activité de l'eau variable (S. V. MATTIGOD et J. A. KITTRICK, 1980).

gibbsite lorsque l'humidité relative diminue, c'est-à-dire lorsque le climat devient plus sec.

2.3. Instabilité de l'eau dans les systèmes hydriques très déficitaires ; ses conséquences

Les ions fortement chargés, tels Al^{3+} ou bien les ions de transition (Fe^{3+} , Ti^{4+} ...), ont toujours tendance à réagir sur les molécules d'eau et à provoquer une réaction du type :



c'est-à-dire une *dissociation* de l'eau

Ce phénomène est alors plus ou moins prononcé suivant les conditions du milieu. Mais dans le cas ou par exemple le rapport $\text{Fe}/\text{H}_2\text{O}$ est élevé, ce qui se produit, soit dans les milieux très peu hydratés, soit encore dans les milieux aqueux relativement concentrés, une grande partie ou même la totalité de l'eau peut ainsi être atteinte. L'évolution enregistrée se traduit donc par une sorte de « *deshydratation* » du système et corrélativement par une *acidification* du milieu (cf. à ce sujet Lj. NALOVIC, 1976 ; Lj. NALOVIC et G. PEDRO, 1979). On comprend alors pour de tels milieux (ce sont en gros les micro-systèmes de contact de l'altération) :

— d'une part que les minéraux secondaires engendrés soient généralement *hydroxylés*, mais non *hydratés* : séricite, chlorite, serpentines...;

— d'autre part, qu'un milieu puisse être très *agressif*, même au contact d'eau pure.

Or, dans les milieux très finement divisés correspondant aux constituants plasmiques argileux, on sait que lors de la dessiccation, les films d'eau

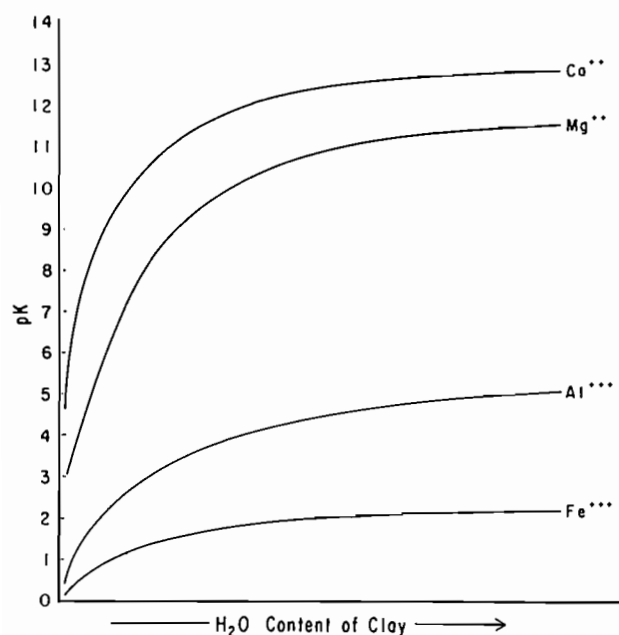


Fig. 9. — Variation supposée du logarithme négatif des constantes d'hydrolyse (pK) des différents cations échangeables de la montmorillonite en fonction de la teneur en eau de l'argile (d'après M. M. MORTLAND, 1968).

résiduelle sont très dissociés et que l'on peut atteindre de fortes acidités, correspondant à une concentration en HCl de l'ordre de 0,5 N (MM. MORTLAND, J. J. FRIPIAT, J. CHAUSSIDON et J. UYTTERHOEVEN, 1963; R. CALVET, J. CHAUSSIDON *et al*, 1964; MM. MORTLAND, 1968; J. J. FRIPIAT, 1971; J. CHAUSSIDON et G. PEDRO, 1979). M. M. MORTLAND (1968) a tracé à cet effet des courbes montrant la variation de pK des différents cations échangeables d'une montmorillonite en fonction de la teneur en eau de l'argile (fig. 9). Il en résulte naturellement des possibilités d'autolyse progressive des minéraux argileux dans des conditions assez surprenantes peut-être, mais probablement pas aussi rares qu'on pourrait le penser à première vue.

3. PLACE DES PHÉNOMÈNES SPÉCIFIQUES AUX MILIEUX PEU HYDRATÉS AU COURS DE L'ÉVOLUTION HYDROLYTIQUE SUPERFICIELLE

Les observations de terrain ont montré depuis longtemps surtout dans les régions tropicales, que l'altération géochimique de surface se traduisait par la mise en place d'un « profil » formé de niveaux bien individualisés qui sont superposés les uns sur les autres depuis la roche mère jusqu'à la surface du sol

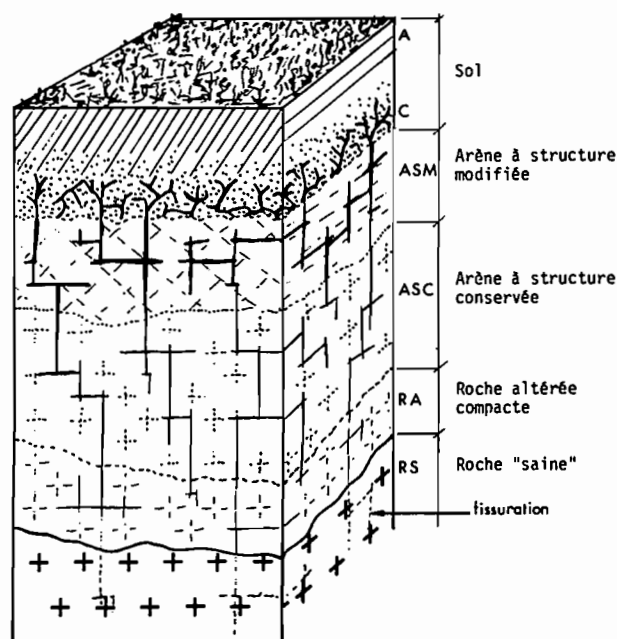


Fig. 10. — Schéma théorique d'un profil d'altération développé sur roches cristallines à la surface du globe.

(fig. 10; cf. aussi Y. CHATELIN, 1974). Ces différents niveaux plus ou moins meubles se retrouvent d'ailleurs quelle que soit la roche mère de départ, mais avec des épaisseurs qui peuvent être très variables en fonction de celle-ci (et aussi du climat). Les travaux les plus récents et les plus précis à cet effet (L. R. GARDNER *et al*, 1978; J. C. PION, 1979 et surtout A. BLOT, 1980) insistent sur le fait que l'existence des transformations superficielles se traduit essentiellement par une diminution progressive des densités apparentes correspondant à la création d'un système poral (résultant de pertes de matières) et simultanément par une *hydratation* plus ou moins importante des matériaux engendrés. On peut donc caractériser tout un profil d'altération en indiquant la répartition volumique de la matière solide, de la porosité et de la teneur en eau (profil hydrique) en fonction de la profondeur (fig. 11). D'une façon générale :

— dans la zone altérée compacte, la porosité est très faible et entièrement occupée par de l'eau;

— au fur et à mesure que l'on monte, la porosité augmente jusqu'à un maximum, en même temps que la teneur en eau (cas des zones des altérites à structure conservée et modifiée). Si toute la porosité est occupée par de l'eau, le milieu est saturé (nappe); mais, d'une façon générale, on se trouve en milieu très humide, non saturé toutefois;

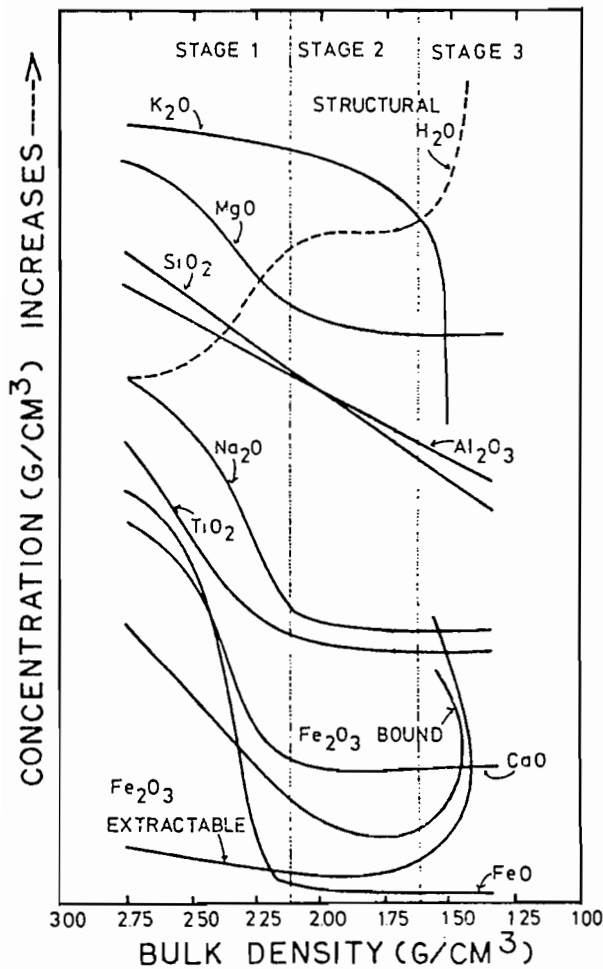


Fig. 11. — Variation de la teneur en différents éléments et en particulier en eau en fonction de la densité apparente des différents niveaux d'altération (L. R. GARDNER *et al.*, 1978).

— enfin, dans le niveau supérieur correspondant à la couverture pédologique, la porosité est maxima, mais en raison de l'évapotranspiration qui se produit au contact de l'atmosphère et de la biosphère, la teneur en eau peut être faible au moins pendant la saison sèche ou en climat très aride.

Il existe donc 3 grands niveaux (tabl. V) :

— un niveau *peu hydraté* où l'altération prend naissance dans les fissures et les *systèmes de contact*. C'est le domaine profond, qu'on peut appeler *altération du 1^{er} degré* en adoptant la nomenclature de J. M. WACKERMANN (1975) ;

— un niveau *nettement hydraté* (sans aller nécessairement jusqu'à la saturation) où l'altération est de type *normal* et se produit en *systèmes plasmiques* (primaire et secondaire). C'est l'*altération du 2^e degré* ;

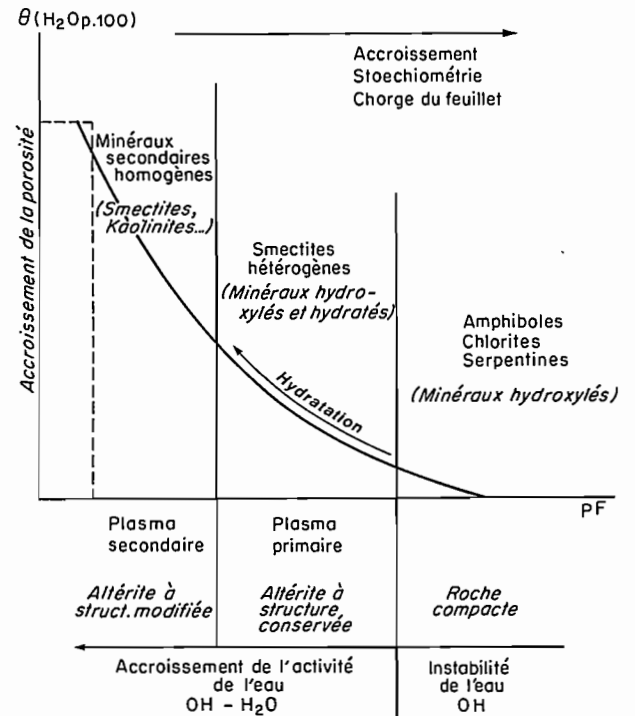


Fig. 12. — Position schématique des différents niveaux d'altération et des minéraux de néogénèse caractéristiques en fonction des conditions hydriques du milieu ($\theta - pF$).

— enfin, un niveau supérieur soumis à la variation des actions climatiques (alternance de dessiccation et d'humectation) et à l'influence de la végétation et de la faune. Il peut être hydraté ou presque anhydre suivant les conditions climatiques. Ce niveau correspond à l'*altération du 3^e degré*.

Laissons pour l'instant le niveau typiquement pédologique et occupons-nous de l'altération naissante et de son passage à l'altération normale au fur et à mesure de l'accroissement de la porosité et de la teneur en eau. Aborder cette question revient en fait à remonter la courbe θ - pF (fig. 2) et ce, que l'on considère l'altération en fonction du temps en un même lieu, ou bien qu'à un moment donné on aille le long d'un profil depuis la roche jusqu'à l'altérite à structure modifiée. On peut donc appliquer ici ce qui a été exposé dans les paragraphes 1 et 2 et qui est schématisé dans la figure 12 et le tableau V.

— Au départ, dans les roches anhydres et compactes, il n'existe pas de réseau permettant la circulation des fluides. Le seul contact, qui peut se

TABLEAU V
Caractérisation verticale des différents niveaux d'altération

Niveaux d'altération	Degré d'altération (J. M. WACKERMAN)	Taux d'hydroxylation et d'hydratation des minéraux caractéristiques	Système d'altération prépondérant	Phénomènes hydriques prépondérants (qualité et mobilité de l'eau)
A Sol C	Altération du troisième degré	Variable	Système plasmique secondaire et système fissural	Horizons zonaux (eau libre et phénomène de convection)
Altérite à structure modifiée (ASM)	Altération du deuxième degré	Minéraux secondaires hydratés et hydroxylés	Système plasmique primaire	Horizons azonaux (eau liée et phénomène de diffusion)
Altérite à structure conservée (ASC)				
Roche altérée compacte (RA)	Altération du premier degré	Minéraux secondaires hydroxylés non hydratés	Système de contact	
Roche saine (RS)	—	Minéraux primaires anhydres	—	—

produire entre les quelques molécules d'eau qui arrivent à ce niveau et le solide, se réalise donc localement dans des domaines situés à la surface ou au sein des minéraux primaires et de leurs discontinuités : fissures, clivages... Il s'agit donc des micro-systèmes de contact avec diffusion prépondérante, tellement déficients en solvant qu'on se trouve dans les conditions d'*instabilité* de l'eau. Il se produit alors une altération des minéraux primaires avec apparition *in situ* de minéraux secondaires très caractéristiques *hydroxylés, mais non hydratés*; leur constitution cristallographique est toujours *stoéchiométrique* et lorsqu'il s'agit de phyllites, leur charge est toujours très élevée ($\neq 1$). On aboutit ainsi à la formation d'amphiboles à partir de pyroxènes (ourallitisation), d'épidote à partir de feldspath (saussuritisation), de chlorites et de serpentines à partir de minéraux ferromagnésiens, de petites muscovites (séricitisation)...

Ces minéraux secondaires sont très influencés par la composition des minéraux primaires. C'est ainsi que les constituants ferromagnésiens donnent toujours des édifices *trioctaédriques*, tandis que les minéraux aluminosilicatés conduisent à des constituants *dioctaédriques* et à fort taux de substitution Si-Al en couches tétraédriques.

— Lorsque l'altération progresse, se développent alors les systèmes *plasmiques* (primaires) qui sont plus hydratés; on reste toutefois dans le domaine où les phénomènes de diffusion, donc de mobilité à courte distance, continuent à se manifester. Ici, l'eau est stable, même si son activité est encore

inférieure à 1, en sorte qu'il se néoforme des *minéraux hydroxylés et hydratés* (de type argiles 2/1), mais avec une constitution encore proche des minéraux primaires parentaux (cf. fig. 6); les constituants ferromagnésiens donnant toujours des smectites *trioctaédriques*. Quant à la stoéchiométrie, elle est déjà moins bonne. On note en même temps, l'apparition de phénomènes de *transformation*. C'est le domaine correspondant à l'altérite à structure conservée.

— Enfin, dès que l'on tombe dans le niveau à structure modifiée, les systèmes fissuraux deviennent prépondérants par suite de la mise en œuvre de mouvements de convection. L'eau étant libre, on se trouve alors dans les conditions d'application des équilibres thermodynamiques : les minéraux de néoformation sont ici fonction de la vitesse de renouvellement des solutions qui est essentiellement sous la dépendance des conditions climatiques. Quoi qu'il en soit, les solutions étant toujours diluées, les minéraux formés (argiles ou hydroxydes) sont hydroxylés (et hydratés éventuellement) de type *dioctaédrique*, à charge faible, et lorsqu'il s'agit d'édifices 2/1, à composition chimique très loin de la stoéchiométrie. En outre, tout l'aluminium tend à disparaître des couches tétraédriques (tabl. VI).

Ce dernier niveau d'altération est en fait (avec les horizons superficiels naturellement) le seul niveau véritablement *zonal*; les 2 autres sont plutôt azonaux, c'est-à-dire *sans* relation directe avec les conditions climatiques (tabl. V).

..

TABLEAU VI

Schéma des relations entre la constitution cristallochimique des phyllosilicates 2/1 de néogenèse et la nature des systèmes d'altération

Éléments interfoliaires caractéristiques		Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Mg(OH) ₂
Nature des minéraux 2/1	Di	Nontronite Montmorillonite	Beidellite		Séricites Illites	
	Tri	Saponites		Vermiculites		Chlorites
Composition de la couche tétraédrique Phyllosilicate 2/1	Si	4	3,5	3,3	3	—
	Al ^{IV}	0	0,5	0,7	1	—
Charge interfoliaire et stoechiométrie		→				
Système d'altération		Système plasmique secondaire		Système plasmique primaire		Système de contact
Degré d'altération		Altération du deuxième degré				Altération du premier degré

Il faut maintenant dire un mot des phénomènes géochimiques (1) caractéristiques du niveau le plus superficiel qui se trouve au contact direct de la biosphère. Il évolue de ce fait sous l'influence de la végétation et des alternances de dessiccation et humectation.

La végétation se traduit, outre son influence physique, par la production de composés organiques qui peuvent être dans certains cas si importants que l'évolution n'est plus une hydrolyse, mais une acidocomplexolyse ou une acidolyse. Comme ces mécanismes interviennent assez peu en zone tropicale, nous ne les développerons pas ici. Cette remarque permet simplement de mieux les situer par rapport aux phénomènes plus profonds, donc moins directement zonaux.

Quant aux régions à climat très contrasté, on sait qu'elles peuvent être marquées en surface par une dessiccation extrême (F. X. HUMBEL, 1976 ; A. CHAUVEL, 1976). En saison sèche, l'humidité du matériau diminue fortement, en sorte que l'on redescend la courbe θ -pF (fig. 13) et que l'on peut retomber de ce fait dans des systèmes très déficients

en eau où les phénomènes de diffusion deviennent prépondérants; d'où la diminution de l'activité de l'eau, puis son instabilité avec apparition d'une forte acidité.

— Si le matériau d'altération est essentiellement formé d'argiles 2/1, il peut alors y avoir destruction *sur place* des minéraux phylliteux avec individualisation d'un profil fortement différencié (planosol) caractérisé par un horizon superficiel A2 exclusivement *quartzueux*. C'est le phénomène de *ferrolyse* (R. BRINKMAN, 1970) ou tout simplement de *xérolyse* (J. CHAUSSIDON et G. PEDRO, 1980).

— Si le matériau est quartzokaolinique comme dans les régions à couvertures ferrallitiques, mais en même temps très riche en fer (D. NAHON, 1976 ; J. C. LEPRUN, 1979), la dessiccation saisonnière tend à acidifier fortement le milieu, en sorte qu'il y a en même temps (et progressivement en fonction du temps) :

— possibilité de redistribution du fer *in situ*, avec tendance à sa concentration sous forme d'oxydes (hématite) jusqu'à l'obtention de véritables *cuirasses* ;

(1) A ce niveau, il y a aussi des transferts et des redistributions en phase solide, dont on ne fera pas état ici.

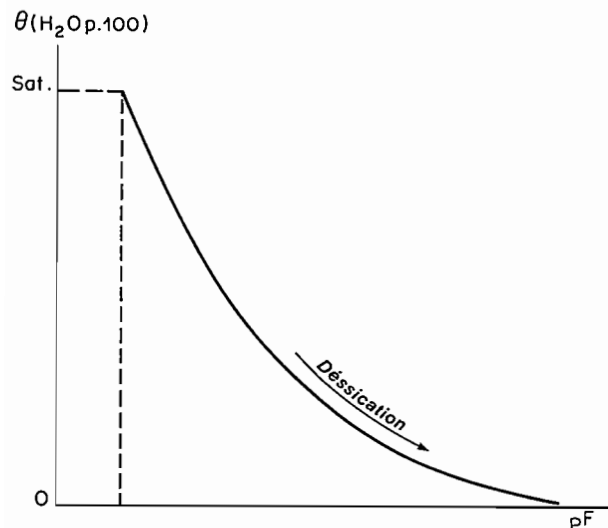


Fig. 13. — Déplacement des conditions hydriques du milieu d'évolution au cours de la dessiccation.

— possibilité d'attaque des argiles kaoliniques avec libération d'aluminium, qui peut alors se recombinaison avec le fer pour donner des oxydes ou oxyhydroxydes mixtes Fe-Al.

C'est ce que J. G. LEPRUN (1979) a appelé la *Ferrallitisation du 2^e genre*, qui semble caractériser les phénomènes de *cuirassement* généralisé (« latérites »), si caractéristique de la zone intertropicale.

Quoi qu'il en soit, on voit que dans ces domaines pédologiques à ultradessiccation saisonnière, les minéraux secondaires en équilibre ne sont plus des silicates hydroxylés (comme dans l'altération profonde du 1^{er} degré), mais plutôt des *oxydes anhydres*

(à la rigueur des oxyhydroxydes) : SiO_2 , Fe_2O_3 , $(\text{FeAl})_2\text{O}_3$ (A. BLOT, 1980 ; J. G. LEPRUN, 1979).

Tout se passe ainsi dans ce cas comme si on était revenu, à un matériau anhydre (roche?), après avoir parcouru une longue « boucle » au long de laquelle se sont succédé à la surface du globe tous les degrés d'hydratation et la plupart des faciès de l'altération hydrolytique.

Conclusion

Dans cette mise au point dédiée à G. AUBERT en souvenir de son œuvre pédologique et plus spécialement en témoignage de gratitude pour son action dans la zone intertropicale, il nous a paru opportun de revenir à l'étude des phénomènes de l'altération hydrolytique, afin de les analyser dans le contexte actuel et de mieux les replacer par rapport à l'ensemble des mécanismes mis en jeu au cours de l'évolution géochimique superficielle.

Notre but essentiel a été ainsi de montrer que les processus de l'hydrolyse ne sont pas aussi uniformes qu'on avait pu l'envisager dans la première phase des recherches et qu'ils présentent en réalité de multiples facettes. Ce sont ces diverses facettes qui ont été précisées au cours de cette étude, puis situées au sein d'une séquence ordonnée aussi bien du point de vue géochimique que structural.

En définitive, l'analyse présentée, qui complète la discussion récemment abordée par G. MILLOT (1980) au sujet de la place des phénomènes d'altération superficielle par rapport aux processus typiquement pédologiques, permet d'appréhender la genèse et la caractérisation des sols tropicaux sur des bases à la fois mieux définies et plus étendues que celles auxquelles on pouvait se référer jusqu'alors.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1941. — Les sols de la France d'Outre-Mer. Monogr. Minist. Agriculture, Paris, 90 p.
- AUBERT (G.), 1954. — Les sols latéritiques. 5^e Cong. Int. Sc. Sol Léopoldville, 1, 103-118.
- AUBERT (G.), 1964. — La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale et aride. *Sols africains*, IX, 1 : 97-106.
- AUBERT (G.), DUCHAUFOUR (Ph.), 1956. — Projet de classification des sols. *C.R. 6^e Cong. Int. Sci. Sol*, Paris : 597-604.
- BLOT (A.), 1980. — L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. O.R.S.T.O.M., *Trav. et Doc.*, n° 114, 434 p.
- BOLT (G. H.), FRISSEL (M. J.), 1960. — Thermodynamics of soil moisture. *Neth. J. Agr. Sci.*, 8 : 57-78.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mémoires Serv. Géol. Alsace-Lorraine*, n° 17, 159 p.
- BOURRIE (G.), PEDRO (G.), 1979. — La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. I. Signification physicochimique. Relation entre le pF et l'activité de l'eau. *Science du Sol*, 4 : 313-322.
- BRESSON (L.-M.), 1980. — Étude ultramicroscopique d'assemblages plasmiques sur lames ultraminces de sols réalisées par bombardement ionique. Workshop of the international Working-Group on submicroscopy of undisturbed soil materials. Wageningen, 14 p. (multigr.).
- BRINKMAN (R.), 1970. — Ferrolysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, 3 : 199-206.
- CALVET (R.), CHAUSSIDON (J.), CLOOS (P.), KIMPE (C. de), FRIPIAT (J. J.), GASTUCHE (M. C.), HELSEN (J.), JELLI (A.), LÉONARD (A.), PONCELET (G.), UYTTERHOEVEN (J.), 1964. — Protons de constitution, protons libres et eau adsorbée. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XIV : 59-98.
- CHÂTELIN (Y.), 1974. — Les sols ferrallitiques. III : L'altération. O.R.S.T.O.M. *Initiations Doc. Techniques*, n° 24, p. 144.
- CHAUSSIDON (J.), PEDRO (G.), 1979. — Rôle de l'état hydrique du système poreux sur l'évolution du milieu. Réalité de l'altération dans les systèmes à faible teneur en eau. *Science du Sol*, nos 2 et 3 « Altération des roches » : 223-237.
- CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Thèse Univ. Strasbourg. O.R.S.T.O.M., *Travaux et Documents*, n° 62, 532 p.
- DELMAS (A.-B.), 1979. — Étude expérimentale des phénomènes de dissolution des sels et des silicates. Approche cinétique. Thèse Univ. Paris VI, 256 p. *Éditions I.N.R.A.*
- DELVIGNE (J.), 1965. — Pédogenèse en zone tropicale, la formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. O.R.S.T.O.M. *Mémoires* n° 13, 177 p.
- FERNANDEZ-MARCOS (F. L.), MACIAS (F.), GUITIAN-OJEA (F.), 1979. — A contribution to the study of the stability of clay minerals from the soil solutions composition at different pF values. *Clay Minerals*, 14, 1, p. 29-38.
- FRIPIAT (J. J.), 1971. — Interaction Eau - Argile. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, XXIII : 1-8.
- FRTZ (B.), 1976. — Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Univ. L. Pasteur et *Mém. Sci. Géol., Strasbourg*, 41 (1975), 152 p.
- GARDNER (L. R.), KHEORUENROMNE (I.), CHEN (H. S.), 1978. — Isovolumetric geochemical investigation of a buried granite saprolite near Columbia, SC, U.S.A. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42 : 417-424.
- GARRELS (R. M.), HOWARD (P.), 1957. — Reactions of feldspar and mica with water at low temperature and pressure. *Clay and clay minerals* (1959). Pergamon Press, 68-88.
- GARRELS (R. M.), CHRIST (C. L.), 1965. — Solutions, minerals and equilibria. 1 vol. Harper and Row NY, 450 p.
- HARDIE (L. A.), 1967. — The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *Amer. Min.*, 52 : 171-200.
- HELGESON (H. C.), 1968. — Evaluation of irreversible reaction in geochemical process involving minerals and aqueous solution. I. Thermodynamic relation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 32, 853-877.
- HELGESON (H. C.), GARRELS (R. M.), MACKENZIE (F. T.), 1969. — II Applications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 455-481.
- HÉNIN (S.), PEDRO (G.), ROBERT (M.), 1968. — Considérations sur les notions de stabilité et d'instabilité des minéraux en fonction des conditions du milieu ; essai de classification des systèmes d'agression. *Int. Cong. Soil Sci.* III : 79-80.

- HÉNIN (S.), PEDRO (G.), 1979. — Rôle de l'hétérogénéité minéralogique du milieu sur les modalités de l'altération. *Science du Sol*, n°s 2 et 3 « Altération des roches » : 209-221.
- HERBILLON (A.), 1974. — Modifications des propriétés de charge provoquées par l'altération chimique. *Pédologie* : 100-118.
- HUMBEL (F. X.), 1976. — L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun : caractéristiques et comportements en relation avec les régimes hydriques et les bioclimats. — Thèse Sci., Paris VI, O.R.S.T.O.M. *Trav. et Doc.*, n° 64, 301 p.
- ILDEFONSE (Ph.), 1978. — Mécanismes de l'altération d'une roche gabbroïque du massif du Pallet. Thèse 3^e cycle. Poitiers, 142 p.
- ILDEFONSE (Ph.), PROUST (D.), MEUNIER (A.), VELDE (B.), 1979. — Rôle des phénomènes de destabilisation - recristallisation successifs dans l'altération des roches cristallines au sein des microsystèmes chimiques. *Science du Sol*, n°s 2 et 3, « Altération des roches » : 239-257.
- LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calcoalcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière. Thèse Paris, 210 p.
- LEPRUN (J.-C.), 1979. — Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse. Transformation. Dégénération. Thèse Sci. Strasbourg, 222 p.
- LOW (Ph. F.), 1951. — Force fields and chemical equilibrium in heterogeneous systems with special reference to soils. *Soil Sci.* 71 : 409-418.
- MATTIGOD (S. V.), KITTRICK (J. A.), 1980. — Temperature and water activity as variables in soil mineral activity diagrams. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 44 : 149-154.
- MEUNIER (A.), 1977. — Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystèmes. Thèse Univ. Poitiers, 248 p.
- MICHARD (G.), FOUILLAC (C.), 1974. — Évaluation des transferts d'éléments au cours des processus d'altération des minéraux par des fluides. *C.R. Ac. Sci. Paris*, 278 D, 2727-2729.
- MILLOT (G.), 1980. — Les grands aplanissements des socles continentaux dans les pays subtropicaux, tropicaux et désertiques. *Livre Jubilaire cent cinquantième Soc. Géol. France* : 295-305.
- MILLOT (G.), 1980. — Géochimie de la surface et formes du relief. *Comptes rendus Acad. Sciences. Exposés de Géologie*, 290 : 1-18.
- MORTLAND (M. M.), FRIPIAT (J. J.), CHAUSSIDON (J.), UYTTERHOEVEN (J.), 1963. — Interaction between ammonia and the expanding lattices of montmorillonite and vermiculite. *J. Phys. Chem.* 67 : 248-258.
- MORTLAND (M. M.), 1968. — Protonation of compounds at clay minerals surfaces. *9th. Int. Cong. Soil Sc.* Adelaïde, I : 691-698.
- NAHON (D.), 1976. — Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal Occidental et en Mauritanie. Thèse Univ. Marseille. Sciences Géol. Strasb. *Mémoires* n° 44, 232 p.
- NALOVIC (Lj.), 1976. — Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols ; Étude expérimentale de l'influence des éléments traces sur le comportement du fer et l'évolution des composés ferriques au cours de la pédogenèse. Thèse Univ., Paris VI, O.R.S.T.O.M., *Travaux et documents* n° 66, 235 p.
- NALOVIC (Lj.), PEDRO (G.), 1979. — Importance de la mise en jeu de micro-systèmes concentrés et de conditions fluctuantes au cours des phénomènes d'altération. *Science du Sol*, n°s 2 et 3 « Altération des roches » : 195-207.
- PEDRO (G.), 1964. — Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Paris, *Ann. Agron.* 15 : 85-191, 243-333, 339-456.
- PEDRO (G.), 1966. — Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération superficielle. *C.R. Ac. Sc. Paris*, 262 D : 1828-1831.
- PEDRO (G.), 1968. — Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Revue Géog. Phys. Géol. Dyn.* X, p. 457-470.
- PEDRO (G.), 1978. — Les conditions de formation des constituants secondaires in *Pédologie*, tome II, in Ph. DUCHAUFOUR et B. SOUCHIER, tome II, chapitre V, p. 58-72.
- PEDRO (G.), SIEFFERMANN (G.), 1979. — Weathering of rocks and formation of soils. Review in modern problems of geochemistry. F. R. Siegel. Ed. U.N.E.S.C.O. : 39-55.
- PETROVIC (R.), BERNER (R. A.), GOLDBERGER (M. B.), 1976. — Rate control in dissolution of alkali feldspars : I. Study of residual feldspar grains by X-ray photoelectron spectroscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 537-548.
- PION (J.-C.), 1979. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Étude de quelques toposéquences en Haute-Volta. Thèse Sci. Strasbourg, 220 p.
- PROUST (D.), 1976. — Étude de l'altération des amphibolites de la Roche l'Abeille. Évolutions chimiques et minéralogique des plagioclases et des hornblendes. Thèse 3^e cycle, n° 605, Poitiers, 85 p.
- PROUST (D.), VELDE (B.), 1978. — Beidellite crystallization from plagioclase and amphibole precursors. *Clay Minerals*, 13, 2, 199-209.
- ROBERT (M.), 1970. — Étude expérimentale de la désagrégation du granite et de l'évolution des micas. Thèse Univ. Paris VI. *Ann. Agro.* 1970 : 777-817 ; 1971 : 43-93 et 155-181.
- SARAZIN (G.), 1979. — Géochimie de l'aluminium au cours de l'altération des granites et des basaltes sous climat tempéré. Thèse Univ. Paris VII, 170 p.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Asie. *Mém. Serv. Géol. Als. Lor.* Strasbourg, n° 31, 199 p.

- THOMASSIN (J.-H.), 1977. — Apport de la spectrométrie de photoélectrons (XPS) à la cinétique géochimique. Étude de la dissolution de quelques silicates magnésiens (forstérite, talc, chrysotile). Thèse de 3^e cycle, Université d'Orléans.
- TOURET (J.), 1980. — Le métamorphisme régional : régime des fluides et grilles pétrogénétiques. Livre Jubilaire cent cinquantaire Soc. Géol. France : 63-70.
- TRESCASES (J.-J.), 1973. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale et la formation des gisements nickélicifères de Nouvelle-Calédonie. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 78, 259 p.
- TRICHET (J.), 1969. — Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques. Travaux Labo. Géol. E.N.S., n° 4, 152 p.
- WACKERMANN (J. M.), 1975. — L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Étude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal Oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. Thèse Sci. Strasbourg, 373 p. *multigr.*
- WINKLER (H. G. F.), 1965. — Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer Verlag.
- WORKING-GROUP on Soil Micromorphology. A.I.S.S.
 — 1978. — Weathering phenomena and neoformations. A progress report. Proceed. 5th Int. Meeting of soil micromorphology. II : 1429-1441.
 — 1979. — Olivines. Their pseudomorphs and secondary products. *Pédologie*. XXIX, 3 : 247-309.

Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes :

Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle

Marcel POUGET

Pédologue, O.R.S.T.O.M. Bureau de Télédétection, Services Scientifiques Centraux, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

RÉSUMÉ

A l'issue d'une étude des relations sol-végétation dans les steppes algériennes le long d'une séquence bioclimatique d'aridité croissante, des observations nouvelles permettent :

— de distinguer deux catégories principales de sols à croûte calcaire : les sols de type I sans horizon laminaire et les sols de type II avec horizon laminaire Kl ;

— d'esquisser, dans les conditions bioclimatiques actuelles, un schéma de leur évolution caractérisée par quatre processus : décapage de l'horizon A, décalcification des horizons supérieurs dans les espaces interfeuillets et l'horizon Kh, induration de l'accumulation calcaire avec formation de pellicules rubanées et de l'horizon laminaire Kl, épigénie calcaire à la base du profil.

Dans cette évolution, le système racinaire de la végétation steppique joue un rôle très important.

ABSTRACT

CALCAREOUS CRUST SOILS IN THE ALGERIAN STEPPES: SOME MORPHOLOGICAL ASPECTS AND OUTLINE OF A CURRENT EVOLUTION

The study about soil vegetation relationship in the Algerian steppes along a bioclimatic sequence with increasing aridity led to new observations which make it possible :

— to distinguish two main types of calcareous-crust soils : type I soils without laminar horizon and type II soils with Kl laminar horizon ;

— to give the broad outline of their evolution, under the current bioclimatic conditions, which is characterized by four processes : scouring of horizon A, decalcification of upper horizons in the spaces between flakes and Kh horizon, induration of the calcareous accumulation along with the formation of banded films and Kl laminar horizon and calcareous epigeny at the base of the profile.

In this evolution, the root system of the steppe vegetation plays a very important role.

Introduction

Depuis fort longtemps, les sols à croûte calcaire ont suscité de très nombreux travaux — que ce soit en Afrique du Nord (DURAND, 1953, 1959; AUBERT, 1947, 1960; BOULAIN, 1957, 1961; RUELLAN, 1970) ou plus généralement dans l'ensemble des régions semi-arides et arides à climat de type méditerranéen ou subtropical. Ce sujet, vaste et complexe, a entretenu et continue à entretenir de larges débats quant à l'origine des croûtes calcaires notamment.

A l'issue d'une étude des relations sol-végétation dans les steppes algériennes le long d'une séquence bioclimatique d'aridité croissante (POUGET, 1980), des observations nouvelles nous permettent :

- de préciser quelques aspects morphologiques et micromorphologiques des sols à croûte calcaire;
- d'esquisser un schéma de leur évolution dans les conditions bioclimatiques actuelles.

1. QUELQUES ASPECTS MORPHOLOGIQUES ET MICROMORPHOLOGIQUES DES SOLS A CROÛTE CALCAIRE

Dans les steppes algériennes (climat méditerranéen aride avec P compris entre 400 et 100 mm), les vastes surfaces encroûtées du Quaternaire ancien et moyen attestent de l'extension considérable des sols à croûte calcaire sur des matériaux divers : alluvions, colluvions de piedmont, argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, marno-calcaires et calcaires, grès, etc.

Leur morphologie présente une très grande diversité en fonction de nombreux facteurs : âge de la surface encroûtée, nature du matériau, situation topographique, etc. Certes, depuis les travaux de RUELLAN (1970), il est possible d'arriver à un certain accord concernant la nomenclature des accumulations calcaires dans les sols; c'est d'ailleurs cette nomenclature que nous utilisons pour la description des profils. Par contre, le terme de « sol à croûte calcaire » employé ici englobe les sols à dalle compacte, les sols à encroûtement feuilleté et même certains sols à encroûtement nodulaire de RUELLAN.

Bien que l'on puisse distinguer aisément ces trois types de sols, malgré un grand nombre de profils de transition, les observations de terrain et l'importance accordée au système racinaire de la végétation steppique nous conduisent à établir une autre distinction basée sur l'absence, ou la présence, d'un horizon laminaire Kl au sein du profil. On rejoint dans une certaine mesure les travaux de GILE *et al.*

(1965, 1966) pour distinguer deux types principaux de profils de sols à croûte calcaire :

- les profils de type I sans horizon laminaire,
- les profils de type II à horizon laminaire.

1.1. Les deux types de profils de sols à croûte calcaire

LES PROFILS DE TYPE I présentent la succession verticale suivante (fig. 1) :

Horizon A : d'épaisseur variable (10-40 cm); brun à brun rougeâtre; texture de la terre fine généralement moyenne; structure finement lamellaire en surface avec croûte de battance, polyédrique subanguleuse moyenne à fine, peu nette; calcaire (< 25-30 % le plus souvent); débris de croûte; nombreuses racines. Sous végétation forestière, il s'agit d'un horizon plus humifère.

Horizon KCr : croûte calcaire beige-rosé à blanchâtre, comprenant une superposition de feuillets séparés par des espaces subhorizontaux plus ou moins anastomosés entre eux et colonisés par les racines. Selon l'âge de la surface encroûtée, la nature du matériau et plus généralement le degré d'évolution de la croûte, chaque feuillet peut être, en totalité ou en partie, induré en dalle compacte. Les surfaces supérieures, parfois aussi latérales, des feuillets sont tapissées par des pellicules rubanées plus ou moins épaisses et de couleurs différentes — saumon, beige, grisâtre à noirâtre. L'induration des feuillets décroît du sommet vers la base de l'horizon.

Horizon Ke : encroûtement calcaire à structure massive, parfois finement feuilletée à la partie supérieure, ou polyédrique nodulaire avec des nodules plus durcis; quelques racines surtout au sommet de l'horizon.

Horizon CCa : très variable selon le matériau; structure souvent polyédrique grossière avec gros amas et nodules calcaires.

LES PROFILS DE TYPE II À HORIZON LAMINAIRE correspondent au stade IV de GILE avec la succession verticale suivante (fig. 2) :

Horizon A : analogue au précédent.

Horizon Kh : épaisseur variable (0 à 30/40 cm); nombreux fragments de croûte dans une matrice de limon sableux « pulvérulent ». Cette matrice, de couleur toujours différente de A, soit plus grise soit plus beige, est très calcaire (40 à 70 %) avec un chevelu racinaire dense formant tapis sur l'horizon laminaire sous-jacent.

Horizon laminaire Kl (1) : pellicule rubanée peu

(1) Kl correspond à une partie seulement de l'horizon K21m de GILE (laminar horizon), c'est-à-dire la partie centrale la plus indurée (hard lower layer).

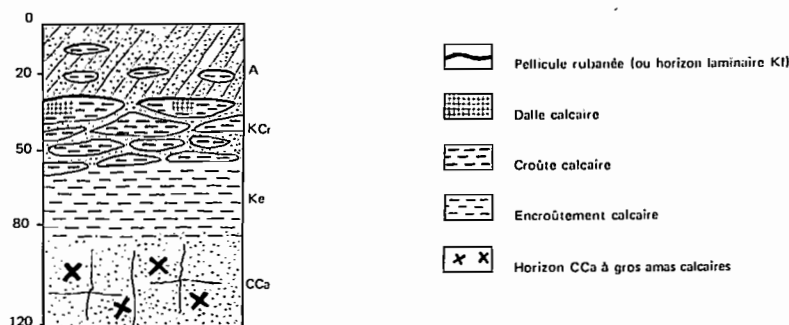


Fig. 1. —

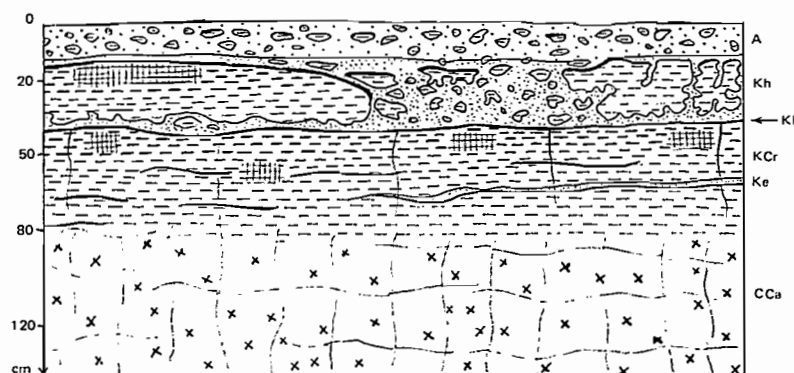


Fig. 2. —

épaisse, quelques millimètres à 2-3 centimètres, constituant un véritable plancher irrégulier mais pratiquement continu au-dessus de la croûte. Un réseau d'étroites fissures permet au système racinaire de s'immiscer en profondeur dans la croûte.

Horizon KCr : croûte calcaire plus ou moins indurée (dalle et/ou croûte) et généralement structurée en feuillets. Les racines se localisent dans les espaces interfeuillets qui ont tendance à s'anastomoser et former un filon continu subhorizontal à la base de la croûte.

Horizon Ke : encroûtement calcaire, très peu de racines.

Horizon CCa : analogue au précédent (cf. type I).

1.2. Quelques caractéristiques analytiques et micromorphologiques

Un rappel de quelques résultats analytiques et d'observations micromorphologiques permet de compléter cette description sommaire du point de vue de la matière organique, du calcaire et des sels solubles.

MATIÈRE ORGANIQUE

Deux points importants sont à souligner :

— on constate une *concentration de matière organique dans l'horizon Kh et dans les espaces interfeuillets* en relation avec la concentration du système racinaire de la végétation steppique. Les taux de matière organique sont généralement de 2 à 5 fois plus élevés que dans les horizons A. Cela est particulièrement net dans les zones où la pluviosité varie entre 200 et 300 mm/an (aride moyen);

— on constate une *différence de nature de la matière organique* entre les horizons Kh et les horizons A (POUGET et AUBERT, 1978; POUGET, 1980) :

— dans les horizons A de surface, la nature des composés humiques est sous la dépendance des bioclimats et des types de formations végétales : dominance des acides humiques gris et de l'humine dont les taux augmentent avec l'aridité du climat et la dégradation du couvert végétal (série classique : forêt de Pin d'Alep-matorrals, steppes à alfa, steppes à chamaephytes, cultures). Pour un même bioclimat et une même formation végétale, steppe à alfa par exemple, le type de matière organique reste prati-

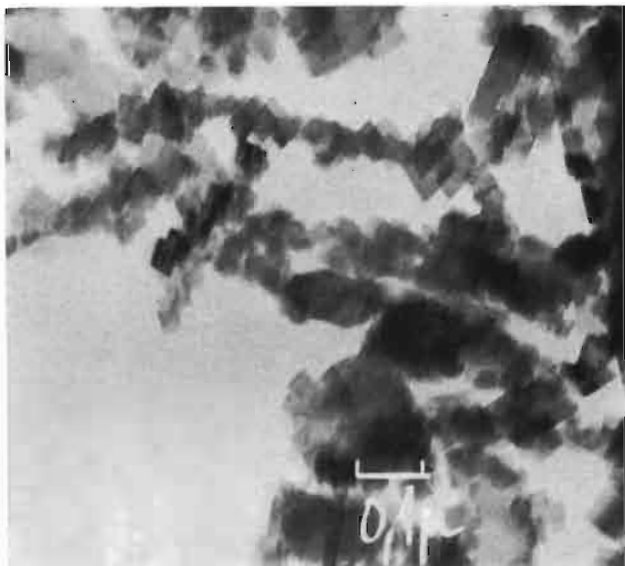


Photo 1. — (MET) Calcite en fins rhomboédres dans
feuillet de croûte calcaire encore peu induré.

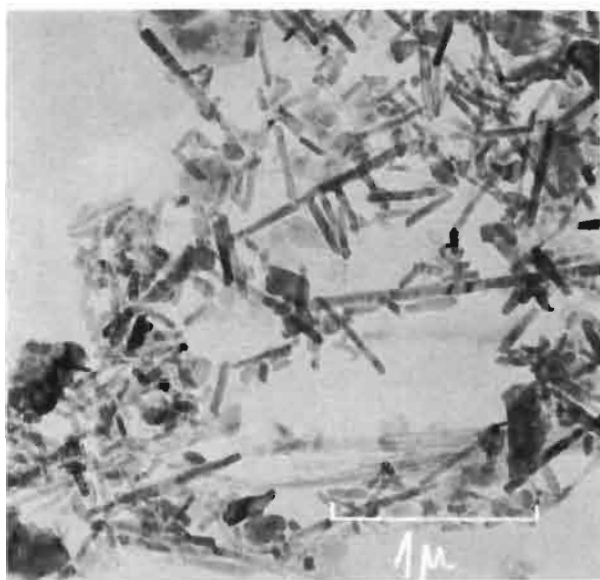


Photo 2. — (MET) Calcite en bâtonnets dans horizons Kh.

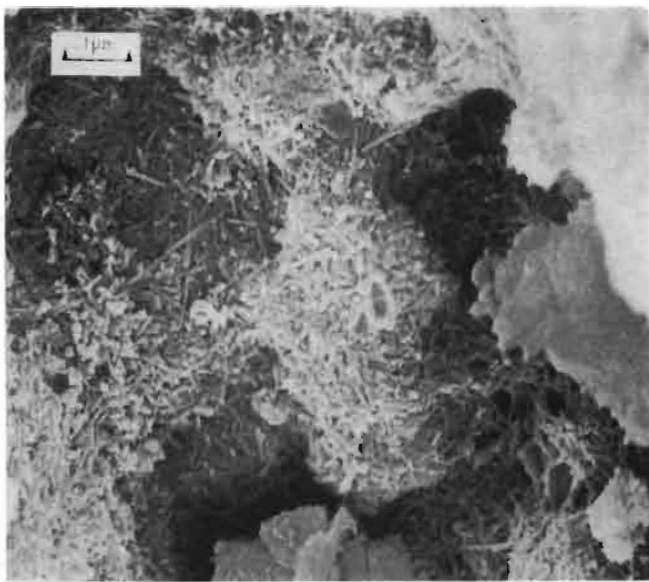


Photo 3. — (MEB) Calcite en bâtonnets dans une sphé-
rolithe de la matrice pulvérulente de l'horizon Kh.

quement identique pour l'ensemble des sols à croûte calcaire et des sols formés sur calcaires durs, marno-calcaires ou grès (sols analogues) ;

— dans les horizons Kh et dans les espaces interfeuilletés, l'influence du carbonate de calcium et des ions Ca^{++} détermine au contraire une forte prédominance des acides fulviques « libres ».

CALCAIRE

Les observations se situent à 4 niveaux des profils :

Dans les horizons A, les fragments de croûte calcaire présentent une zone corticale externe plus colorée par des oxydes de fer et surtout par des particules argileuses. A l'œil nu, ce cortex d'altération donne aux débris de croûte un aspect « sali » et terreux que l'on retrouve aussi à l'intérieur des fragments eux-mêmes, sur la paroi des nombreux vides. Très souvent, ces fragments correspondent aux accumulations calcaires les plus denses et les plus indurées : pellicules rubanées, dalle compacte, croûte ou nodules. Leur taille va de quelques centimètres à quelques dixièmes de millimètres et l'on passe alors à des sphérolithes de calcite réparties çà et là dans l'horizon. Entre ces reliques de croûte, la terre fine reste peu calcaire et l'on n'observe pratiquement pas de figures de recristallisation de calcite.

Dans l'horizon Kh, la croûte est représentée par des feuilletés le plus souvent bien individualisés et disposés subhorizontalement. A l'œil nu, les figures d'altération et de dissolution s'observent très nettement à la partie inférieure des feuilletés où la croûte plus légère et plus poreuse, est creusée de golfes de corrosion envahis par la matrice pulvérulente et le système racinaire.

L'étude micromorphologique montre que :

— la matrice pulvérulente est constituée presque exclusivement de sphérolithes (20 à 100 μ de diamètre) de calcite micritique. Il en est de même dans les espaces interfeuilletés de KCr ;

— les débris de croûte présentent des faciès variés selon leur emplacement dans le feuillet initial :

la partie inférieure apparaît comme un cristalliplasma assez lâche de calcite micritique avec des « noyaux » plus individualisés qui semblent se « libérer » peu à peu pour rejoindre les sphérolithes constituant la matrice pulvérulente.

la partie supérieure, généralement plus indurée, pellicule rubanée ou dalle, est au contraire un cristalliplasma micritique très dense, « taradé » par de nombreux vides où l'on observe souvent des cristaux de calcite en aiguilles de 20 à 100 μ de long (lublinite).

Dans l'horizon laminaire Kl, et plus généralement au niveau des accumulations les plus indurées,

dalles, pellicules rubanées, croûtes et nodules durcis, la calcite se présente également sous la forme d'un cristalliplasma micritique très dense.

A la base du profil, dans l'horizon CCa, on reconnaît les principaux processus d'épigenèse calcaire décrits récemment par MILLOT *et al.* (1977) : altération argileuse, calcitisation dans les lumières des microfissures (lublinite, micrite), épigénisation de la masse de l'horizon avec des « nuages » de micrite qui s'installent dans les grains de quartz, etc.

En outre, l'examen au microscope électronique MET et MEB permet de distinguer deux faciès principaux de calcite micritique :

— la calcite en rhomboédres, plus ou moins nets et d'épaisseur variable, caractérise les dalles, les pellicules rubanées anciennes, les noyaux indurés et compacts dans les croûtes et les encroûtements. Les rhomboédres, épais (opaques au MET) au niveau des dalles, sont beaucoup plus fins et plus nets dans les croûtes encore peu indurées (photo 1) ;

— la calcite en bâtonnets (photo 2) correspond à des cristaux allongés de 0,1 à 2-3 μ , rarement davantage, souvent regroupés et enchevêtrés les uns dans les autres pour former un véritable treillis (aspect « nid de pie »). Très abondants dans la matrice pulvérulente des horizons Kh, ils s'observent également dans les parties poreuses et peu denses des feuilletés de croûte et des encroûtements ainsi que dans les horizons laminaires grisâtres les plus récents — les bâtonnets sont alors plus courts et irréguliers (observations au MET).

Dans la matrice pulvérulente des horizons Kh et des espaces interfeuilletés, la plupart des sphérolithes de calcite micritique sont creusées, comme une « éponge », de cavités tapissées par un réseau très dense de bâtonnets (photo 3). Alors que la partie externe des sphérolithes est constituée de cristaux très émoussés et arrondis, en voie de dissolution, les bâtonnets apparaissent nettement comme une recristallisation secondaire de calcite qui trouve ici une structure d'accueil favorable, les cavités à l'intérieur des sphérolithes.

SELS SOLUBLES

On constate très souvent une accumulation saline plus ou moins importante au sein des sols à croûte calcaire. Cette accumulation dépend pour une large part de la situation topographique, des bioclimats et du type de sol.

On observe ainsi une salure discontinue, mais localement très élevée (jusqu'à 20-30 mmhos-cm) dans la matrice pulvérulente des horizons Kh pour les profils situés dans les parties aval des toposéquences recevant entre 200 et 300 mm de pluies par an (aride moyen). Une salinité excessive peut

alors se manifester en surface avec les « plages de salure » (POUGET, 1980).

En zones plus humides (P supérieur à 300 mm), les sels s'accumulent à la partie inférieure des horizons KCr, ou sont entraînés latéralement vers les axes de drainage. En zones plus arides (P inférieur à 200 mm), la dynamique des sels, comme celle de l'eau, est fortement ralentie et ne parvient pas à se hiérarchiser et à s'organiser pour aboutir à des concentrations comparables aux précédentes.

Enfin, il est important de souligner que des salures aussi élevées augmentent la solubilité du carbonate de calcium et favorisent sa dynamique actuelle.

Conclusion

Deux faits importants sont à retenir concernant la dynamique de l'eau dans les profils et la destruction de la croûte dans les horizons supérieurs.

L'importance accordée au système racinaire, pour distinguer les deux principaux types de sols à croûte calcaire, revient en fait à rendre compte, en zones arides, d'une certaine dynamique de l'eau. L'absence ou la présence d'horizon laminaire conditionne en effet le développement des racines, mais aussi le régime hydrique du profil et par là, l'évolution actuelle des sols du point de vue de la matière organique, de la dynamique du calcaire et des sels :

- dans les profils de type I, le drainage vertical, comme l'implantation du système racinaire, se fait en profondeur par les espaces interfeuilletés. La dynamique de l'eau tend à être verticale et profonde ;

- dans les profils de type II, le drainage vertical, comme le système racinaire, est bloqué par l'horizon laminaire. La dynamique de l'eau tend à être latérale et subsuperficielle au niveau de l'horizon Kh.

On vérifie, à la suite de nombreux auteurs, la destruction (*litholyse*) de la croûte dans les horizons supérieurs des profils :

- dans les horizons A, il s'agit d'un stade très avancé où ne subsistent que les fragments les plus résistants, dalles et pellicules rubanées. L'ambiance physicochimique apparaît plus calcique que calcaire comme le montrent la nature des composés humiques et l'absence de figure de recristallisation ;

- dans les horizons Kh et les espaces interfeuilletés, il s'agit d'une zone active de destruction de la croûte. L'ambiance physicochimique est celle d'un milieu poreux très calcaire comme l'indiquent la nature des composés humiques et les figures de recristallisation de calcite. Le bilan global est incontestablement à un départ de calcaire.

2. ESQUISSE D'UNE ÉVOLUTION ACTUELLE DES SOLS A CROÛTE CALCAIRE

2.1. Distribution dans le paysage des deux types de sols à croûte calcaire

La figure 3 illustre, avec un exemple de chronotoposéquence, la localisation des sols et les passages latéraux d'un type de profil à l'autre.

Ainsi, un certain nombre de facteurs s'avèrent favorables à la formation des horizons laminaires : âge de la surface encroûtée, situation topographique, nature du matériau, etc. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'horizon laminaire est d'autant mieux développé, plus épais et plus induré que :

- la surface est plus ancienne ;
- le profil est situé dans les zones aval des glacis, en particulier au niveau des talus de raccordement où la circulation latérale des solutions est plus superficielle ;
- le matériau est graveleux ou présente une différence texturale.

Compte tenu de ces facteurs, il est intéressant de préciser la distribution des profils à horizon laminaire en fonction des conditions écologiques actuelles : bioclimats et végétation.

- Les profils de type II s'observent dans l'ensemble des steppes algériennes, mais deviennent très rares en zones plus humides ($P > 400$ mm) où ils se localisent de préférence sur les surfaces du Quaternaire moyen.

- Très rares sous végétation forestière, ils se retrouvent le plus souvent sous végétation steppique. Deux cas sont à considérer en fonction de l'âge de la surface encroûtée :

- . sur les surfaces du Quaternaire ancien, les horizons Kl sont plus profonds et moins fréquents sous les steppes à alfa ;

- . sur les surfaces du Quaternaire moyen, les horizons Kl s'observent aussi bien sous steppe à alfa que sous steppe secondaire à chamaephytes.

2.2. Schéma d'une évolution dans le temps

L'observation de très nombreux profils dans les toposéquences permet d'esquisser une évolution dans le temps. En prenant l'exemple des surfaces formées sur un matériau homogène, les argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, il est possible de schématiser les principaux stades d'une évolution verticale du profil de sol à croûte calcaire (fig. 4) :

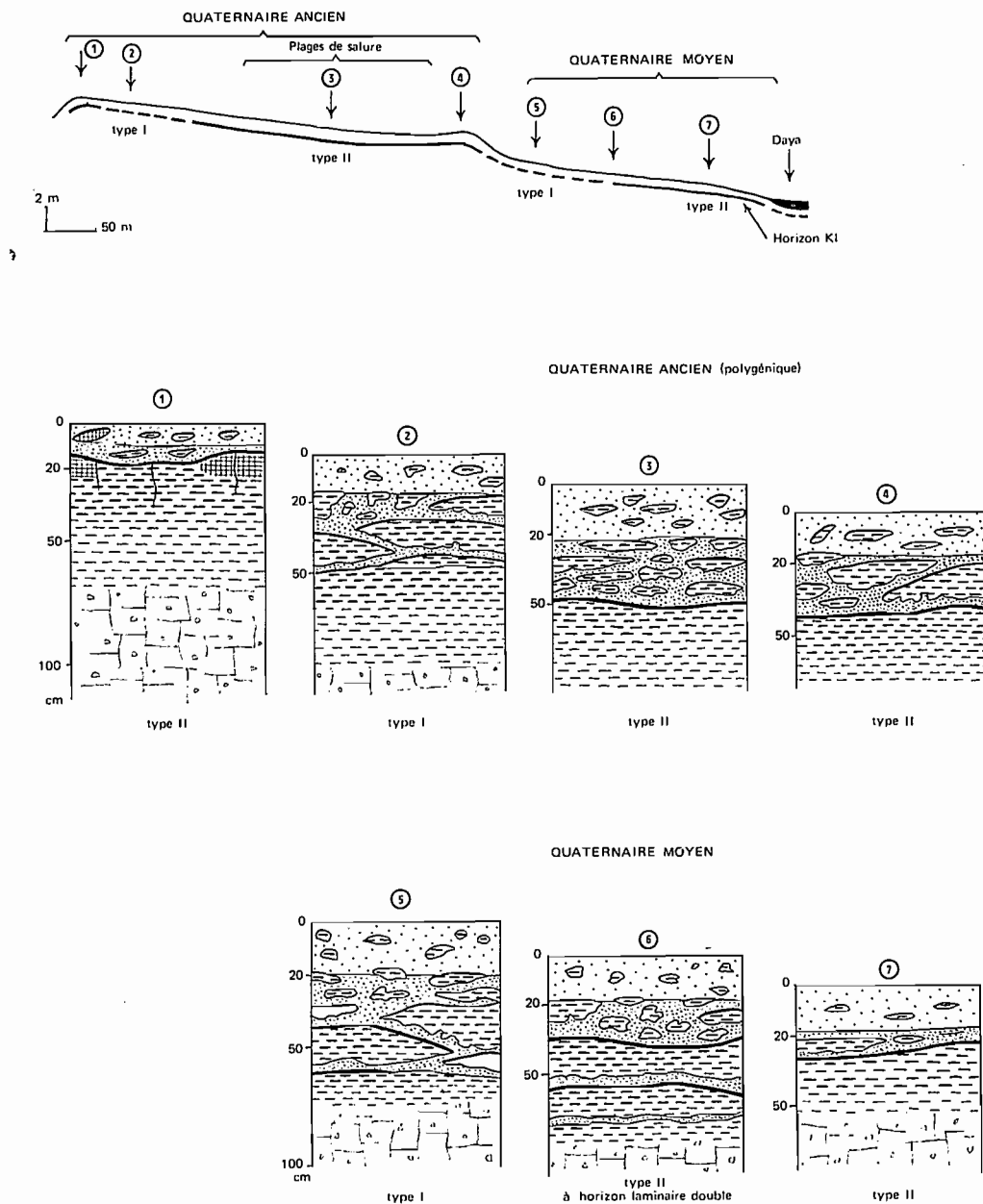


Fig. 3. — Exemple de distribution des sols à croûte calcaire en fonction de l'âge des surfaces encroûtées et de la situation topographique (steppe à chamaephytes et alfa rélictuel).

- ① — stade initial à horizon A humifère, éventuellement sous végétation forestière (stade facultatif).
- ②③ — Stades de sols à croûte calcaire de type I.
- ④⑤ — Individualisation progressive de l'horizon laminaire Kl_1 et de l'horizon Kh_1 . L'érosion en nappe continue le décapage de l'horizon A

- ⑥ — Stade du profil type à horizon laminaire.
- ⑦ — Formation d'un second horizon laminaire Kl_2 . La présence de fissures verticales permet au système racinaire de s'immiscer plus ou moins à l'intérieur de la croûte et de dégager

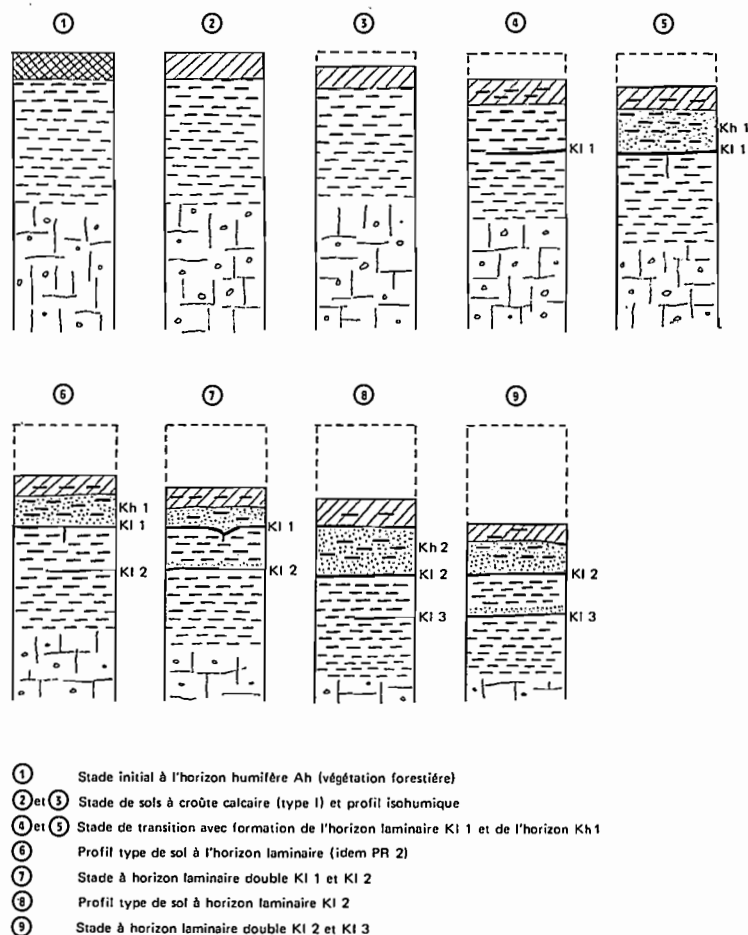


Fig. 4. — Schématisation de l'évolution dans le temps des sols à croûte calcaire : — décapage de l'horizon A ; — décalcarification des horizons supérieurs dans les espaces interfeuillets et l'horizon Kh ; — induration de l'accumulation calcaire avec formation des pellicules rubanées et des horizons Kl ; — épigénie calcaire à la base du profil.

des espaces interfeuillets. Il le fait d'autant plus facilement que la masse encroûtée n'est pas trop indurée (Quaternaire moyen) et qu'il est lui-même suffisamment « agressif ».

- ⑧ — L'horizon laminaire Kl_1 et les feuillets sous-jacents sont progressivement détruits pour former Kh_2 .
- ⑨ — L'évolution se poursuit avec l'individualisation d'un troisième horizon laminaire Kl_3 .

En définitive, un tel schéma illustre, pour les profils de sols à croûte calcaire, une dynamique d'ensemble déjà envisagée par RUELLAN *et al.* (1977). Elle peut se caractériser par quatre processus : décapage de l'horizon A, décalcarification des horizons supérieurs, reformation et induration des feuillets de croûte, épigénie calcaire à la base du profil.

Le décapage de l'horizon A par l'érosion en nappe oblige le système racinaire à s'enfoncer davantage. L'horizon se développe aux dépens des feuillets supérieurs de la croûte.

La décalcarification des horizons supérieurs détruit les feuillets de croûte qui se reforment peu à peu en profondeur. Cette décalcarification s'effectue au niveau des espaces interfeuillets et au niveau des horizons Kh dans une zone d'intense activité du système racinaire.

Dans les sols de type II, l'enfoncement du front de décalcarification ne se fait pas aussi régulièrement, ni semble-t-il aussi vite, que dans les sols de type I. La présence de l'horizon laminaire détermine une dynamique différente, la progression se faisant par « tranches ». Alors que la destruction se poursuit dans Kh, le système racinaire prépare une nouvelle

« tranche » de croûte en individualisant, au-dessous, d'autres espaces interfeuillets et un autre horizon Kh. Comme pour les feuillets de croûte, l'épaisseur des tranches est plus faible au niveau des zones de drainage (rupture de pente, bordure de thalwegs) et plus importante dans les zones planes.

La décalcarification s'accompagne d'une recristallisation secondaire de calcite en très fins bâtonnets dans toutes les structures d'accueil favorables créées par la destruction des feuillets, microcavités à l'intérieur des sphérolithes par exemple. La taille et la forme des cristaux serait en relation avec plusieurs facteurs :

— dans ce milieu poreux et très calcaire où l'activité du système racinaire est intense, les alternances rapides dissolution-dépôt favorisent une cristallisation en petits cristaux d'autant qu'il existe de très nombreux sites de croissance ;

— la présence d'ions étrangers tel le magnésium contribue à la formation de cristaux allongés. Le magnésium est en effet généralement abondant comme en témoignent la salure des horizons Kh et l'importance de l'attapulgitite dans le profil ;

— la présence de composés organiques qui pourraient être adsorbés sur les sites de croissance générerait la formation de cristaux de type rhomboédrique (DURAND, 1978).

La reformation des feuillets de croûte en profondeur se traduit par une *induration de l'accumulation calcaire* à deux niveaux :

— d'une part, les pellicules rubanées et l'horizon laminaire se forment à la base des espaces interfeuillets et de l'horizon Kh. L'induration résulterait d'un « colmatage » du plancher des espaces interfeuillets par un dépôt de calcite en bâtonnets. Les pellicules rubanées et les horizons laminaires grisâtres, les plus récents, sont effectivement constitués de calcite en bâtonnets qui, avec le temps, évolueraient en rhomboèdres tels qu'on les observe dans les pellicules de couleur saumon, les plus anciennes et les plus indurées ;

— d'autre part, la croûte elle-même, au-dessous des pellicules rubanées et de l'horizon laminaire, a tendance à s'indurer. Dans ce milieu peu poreux et protégé de l'influence racinaire directe, la diffusion des solutions saturées se fait lentement car les équilibres sont longs à s'établir à travers la microporosité. Cela favorise une cristallisation de calcite en rhomboèdres. Dans les croûtes encore peu indurées, il s'agit de fins rhomboèdres (photo 1) devenant beaucoup plus épais et jointifs dans les dalles compactes.

On assiste ainsi à une véritable « maturation » des cristaux de calcite avec pour résultat une induration,

et à la limite une « pétrification », de l'accumulation calcaire.

— Le quatrième processus, l'*épigénie calcaire*, contribue à propager l'accumulation calcaire en profondeur dans l'encroûtement et surtout dans l'horizon CCa.

En conclusion, avec le temps, les profils à croûte calcaire s'enfoncent peu à peu dans le paysage malgré le troisième processus, l'induration de l'accumulation calcaire, qui tend à ralentir cette évolution. Latéralement, les profils de type II envahissent le modelé en remontant vers l'amont des toposéquences. Ils contribuent à l'aplanissement des versants encroûtés.

Ainsi pour les surfaces les plus anciennes (Quaternaire ancien), formées sur un matériau relativement tendre et homogène, les argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, on aboutit à un *stade de vieillissement* caractérisé par une topographie sub-horizontale et par des sols de type II à dalle calcaire très épaisse. Ces horizons d'accumulation fortement indurés jouent le rôle de roche calcaire dure sur laquelle se surimpose une pédogenèse de type karstique avec, par exemple, la formation de dayas si fréquents dans les steppes algériennes. Cette évolution a pu être remise en cause par des mouvements tectoniques au cours du Quaternaire (glacis polygéniques).

Sur un matériau alluvial ou colluvial plus hétérogène et caillouteux, l'induration de l'accumulation calcaire devient très forte (dalle conglomératique) et freine l'enfoncement des profils ; cela explique une plus faible évolution des versants dans ce cas.

2.3. Évolution actuelle des sols à croûte calcaire

Dans les conditions bioclimatiques actuelles les quatre processus envisagés précédemment interviennent plus ou moins efficacement en fonction des caractéristiques des horizons encroûtés et des facteurs qui conditionnent le profil hydrique des sols, situation topographique, état de la surface, bioclimats, végétation. Ainsi, lorsque les horizons encroûtés sont déjà très fortement indurés, compacts, caillouteux et épais, l'évolution actuelle se trouve limitée. Il en est de même lorsque la pluviosité est inférieure à 200 mm/an.

Le décapage de l'horizon A sera favorisé par tout ce qui tend à accentuer l'érosion en nappe ou éventuellement l'érosion éolienne : pente, texture de l'horizon de surface, dégradation du couvert végétal, etc.

La décalcarification des horizons supérieurs et la destruction des feuillets de croûte sera d'autant

plus efficace que le climat est humide, l'activité du système racinaire importante, l'induration faible, etc.

La formation et l'évolution des pellicules rubanées et des horizons laminaires sera fonction de l'intensité des processus précédents. Par contre, la « maturation » des accumulations est privilégiée par la stabilité verticale des profils. Comme l'épigénie calcaire, elle se poursuit dans l'ensemble de la zone steppique.

Pour rendre compte d'une très grande diversité de situations possibles, il est commode d'envisager des schémas d'évolution dans les principaux bioclimats le long d'une séquence d'aridité croissante.

P = 300-400 mm (aride supérieur)

Le système racinaire de la végétation steppique vivace participe activement à l'approfondissement des profils de sols à croûte calcaire : destruction des feuillets supérieurs, formation et évolution des horizons laminaires encore relativement profonds. Cet approfondissement compense sensiblement les effets de l'érosion en nappe qui décape la partie supérieure de l'horizon A. Pour la végétation de steppe, surtout une steppe à alfa, le complexe sol-végétation représente un véritable système biogéodynamique en équilibre relatif.

La dégradation du couvert végétal par surpâturage ou mise en culture a pour conséquence un ralentissement important de l'évolution de la croûte. Celle-ci tend à devenir davantage un support pour le sol dont l'épaisseur diminue sans que le système racinaire puisse participer à l'approfondissement du profil. Cependant un retour à la végétation de steppe à chamaephytes est possible si l'action de l'homme est suffisamment « volontaire » en ce sens.

P = 200-300 mm (aride moyen)

Dans ces zones plus arides, les processus de pédogenèse deviennent de plus en plus superficiels : l'horizon A est moins épais, l'horizon Kh très humifère souligne la « pression » du système racinaire sur l'horizon laminaire proche de la surface, les sels ont tendance à s'accumuler localement au-dessus de la croûte, etc. Cela est particulièrement net sur les surfaces encroûtées les plus anciennes dans les zones aval des toposéquences où la steppe à alfa cède la place à une steppe secondaire à chamaephytes. Ce changement de végétation apparaît à la fois comme un effet et une cause des processus de salinisation et de la généralisation des horizons laminaires toujours plus proches de la surface en raison du décapage de l'horizon A. Le complexe sol-végétation exprime un système biogéodynamique en déséquilibre et en voie de désertisation.

La destruction du couvert végétal par l'homme

accentue cette dégradation irréversible des sols et de la végétation. L'approfondissement du profil est bloqué et la végétation steppique vivace ne peut pratiquement plus se réinstaller sur les surfaces les plus anciennes à cause de l'horizon laminaire et localement de la salure. Par contre, l'induration se poursuit.

P = 100-200 mm (aride inférieur)

En raison de l'aridité, l'activité insuffisante du système racinaire n'exerce pas d'influence efficace sur la dynamique du calcaire et des sels. Le régime hydrique n'autorise qu'une décalcarification limitée pratiquement à l'horizon A. La dynamique latérale dans les horizons Kh reste très faible, sinon épisodique. Le décapage de l'horizon A souligne, comme dans l'ensemble de la steppe, l'importance du ruissellement en nappe. Une évolution des profils est alors encore possible dans les zones où les eaux se concentrent, en particulier dans les chenaux d'oueds alluvionnés et les dayas. Par contre, ici aussi, les processus d'induration et de maturation se poursuivent au sein des feuillets supérieurs de croûte.

3. CONCLUSION

Dans les steppes algériennes, la végétation steppique joue un rôle important dans l'évolution actuelle des sols à croûte calcaire ($P > 200$ mm). Par son système racinaire, elle participe à un certain approfondissement des profils avec la destruction de la partie supérieure de la croûte au niveau des espaces interfeuillets et des horizons Kh.

La formation des horizons laminaires Kl se poursuit actuellement au sein des sols à croûte calcaire. Elle est favorisée par tout ce qui a tendance à altérer le profil hydrique et à diminuer la profondeur de l'enracinement, en particulier :

- la dégradation du couvert végétal dans le sens : végétation forestière, steppe à alfa, steppe à chamaephytes;

- l'aridité croissante dans un contexte climatique ni trop humide ni trop sec (P compris entre 400 et 200 mm);

- la situation topographique (pente) et la nature du matériau (différence texturale).

La mise en valeur des sols à croûte calcaire ne peut ignorer la présence très fréquente d'horizons laminaires. Cette caractéristique morphologique majeure conditionne non seulement le profil hydrique, mais aussi l'efficacité de certaines techniques d'aménagement — rootage pour les plantations forestières par exemple.

interventions des participants

G. MILLOT : Cette contribution est très intéressante, car nous sont présentées les figures de dégradation des encroûtements calcaires. Figures supérieures, internes et basales. Et comme pour les cuirasses ferrugineuses, nous prenons connaissance, après tant de travaux sur la genèse des accumulations, des figures de dégradation avec des analogies, qui ne sont pas des homologies.

C. SYS : Dans le bassin sédimentaire d'Iran, nous avons eu l'occasion d'étudier l'évolution des accumulations calcaires et des minéraux argileux.

Les dépôts récents ne présentent aucune accumulation secondaire de CaCO_3 , et la minéralogie des argiles est dominée par la montmorillonite avec des traces d'illite. Les dépôts subrécents présentent une redistribution de CaCO_3 exprimée par un mycelium calcaire dans morphologie du profil; en même temps, l'attapulгите augmente légèrement. Au niveau de la terrasse du Pleistocène supérieur, le CaCO_3 se présente sous forme de nodules, et l'attapulгите devient très importante dans la fraction argileuse.

Finalement, les surfaces du Pleistocène moyen et inférieur sont coiffées de croûtes calcaires; les argiles associées sont essentiellement de l'attapulгите, cependant associée avec un peu de montmorillonite.

A. RUELLAN : Le type II n'est peut-être pas seulement le résultat de la dégradation de la croûte sous-jacente. Je pense qu'il y a aussi construction au-dessus de la dalle et de la pellicule rubanée d'un nouvel horizon d'accumulation de calcaire.

J. DURAND : Des croûtes zonaires se trouvent en Afrique du Nord, mais aussi aux Canaries à Lanzarote, au Yémen, à Djibouti et à Madagascar, aux environs de Sakaraha.

Dans les croûtes de Lanzarote, l'argile identifiée est la vermiculite.

G. AUBERT : L'exposé très clair de M. POUGET et la longue discussion qui l'a suivi, montrent toute l'évolution, depuis les années 1935-1945 où quelques pédologues ou géologues comme J. H. DURAND, moi-même et d'autres, entreprenaient leur étude « connaissances sur ces sols à croûte calcaire », leurs divers modes de formation encore que ce point ait été à peine effleuré par suite du manque de temps. Des recherches doivent être poursuivies sur le terrain ainsi qu'au laboratoire (micromorphologie, minéralogie approfondie, peut-être expérimentation). Elles peuvent porter plus particulièrement, me semble-t-il sur :

- la typologie de ces sols et leurs relations avec les différents facteurs tels que conditions climatiques et végétations actuelles et passées (?); géomorphologie, topographie; nappe phéatique, le cas échéant;
- leur évolution actuelle dans divers cas bien précis, en fonction des facteurs précédents, et, plus particulièrement le rôle de la végétation et de la matière organique sur cette évolution;
- la dynamique de l'eau (et profondeur de pénétration), du calcaire et des sels dans ces divers types de sols;
- leur mode d'évolution et de formation et le rôle qu'y jouent l'épigénie et les actions mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1947. — Les sols à croûtes calcaires. *Conf. Pédolog. médil., Montpellier-Alger* : 330-332.
- AUBERT (G.), 1960. — Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. *Actes Coll. U.N.E.S.C.O. de Paris sur les problèmes de la zone aride* : 127-150.
- BOULAIN (J.), 1957. — Étude des sols des Plaines du Chélif. *Thèse Doct. État, Alger* : 582 p.
- BOULAIN (J.), 1961. — Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. *C.R. Acad. Sc.*, 253 : 2568-2570.
- DURAND (J.-H.), 1953. — Étude hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. *Publ. Gouv. Gén. Algérie; S.E.S., Alger*, 209 p.
- DURAND (J.-H.), 1959. — Les sols rouges et les croûtes en Algérie. *S.E.S., Alger*, 188 p.
- DURAND (R.), 1978. — La pédogenèse d'une rendzine encroûtée développée sur la craie à poches de cryoturbation en Champagne. *Thèse Doct. État, Strasbourg*.
- GILE (L. H.), PETERSON (F. F.) and GROSSMAN (R. B.), 1965. — The K horizon. A master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Science (Baltimore)*, 99, 2 : 74-82.
- GILE (L. H.), PETERSON (F. F.) and GROSSMAN (R. B.), 1966. — Morphological and genetics sequences of carbonate accumulation in deserts soils. *Soil Science (Baltimore)*, 101, 5 : 347-360.
- MILLOT (G.), NAHON (D.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.) et TARDY (Y.), 1977. — L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride, AntiAtlas, Maroc. *Sci. Géol., Bull., Strasbourg*, 30, 3 : 129-152.
- POUGET (M.) et AUBERT (G.), 1978. — La matière organique dans les steppes algériennes. *Comm. au XI^e Congrès de l'I.S.S.S., Edmonton*, p. 386.
- POUGET (M.), 1980. — Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, n° 116, 555 p.
- POUGET (M.) et RAMBAUD (D.), 1980. — Quelques types de cristallisation de calcite dans les sols à croûte calcaire (steppes algériennes). Apport de la microscopie électronique. *Réunion Carbonates, Bordeaux* (à paraître).
- RUELLAN (A.), 1970. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de Basse-Moulouya (Maroc oriental). Contribution à la connaissance des sols méditerranéens. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 54, 302 p.
- RUELLAN (A.), NAHON (D.), PAQUET (H.) et MILLOT (G.), 1977. — Géochimie de la surface et formes du relief. IV. Rôle des encroûtements et épigénies calcaires dans le façonnement du modelé en pays aride. *Sci. Géol., Bull., Strasbourg*, 30, 4 : 283-288.

Pédologie et écologie en zone aride au nord du Sahara

Aménagement agropastoral d'une région du Sud Tunisien sur des bases écologiques

R. PONTANIER

Pédologue, Représentation O.R.S.T.O.M., BP 1857, Yaoundé, Cameroun (1)

En utilisant comme intégrateur du milieu naturel le « système écologique », l'inventaire interdisciplinaire privilégiant la dynamique permet, en zone aride à forte pression humaine, de détecter les causes et l'importance des déséquilibres créés par une mauvaise gestion des ressources naturelles renouvelables. L'utilisation d'un modèle basé sur les matrices de transition permet de mieux cerner l'évolution du niveau des ressources naturelles régionales. Dans l'hypothèse du maintien des pratiques de gestion actuelles du territoire, il apparaît qu'au terme de 25 ans une partie importante du potentiel des ressources renouvelables sera définitivement perdu, pour un gain immédiat des productions relativement faible.

Devant cet état de fait, on peut proposer des schémas de gestion de l'espace rural, sur des bases écologiques, permettant d'augmenter le revenu agricole tout en sauvegardant le milieu naturel.

Ainsi deux scénarios sont présentés pour l'aménagement d'une zone agro-pastorale du Sud tunisien (Zougrata, 80 000 ha, moyenne des précipitations annuelles : 175 mm) :

— un aménagement régional avec localisation optimale des cultures; il doit permettre de satisfaire à la demande en céréales tout en limitant la céréaliculture sur les sols sensibles à l'érosion;

— un aménagement régional pastoral avec réduction des surfaces cultivées, et organisation du parcours.

La simulation de ces deux scénarios, ainsi que celle du maintien des pratiques actuelles, permet d'effectuer des comparaisons chiffrées sur les effets de ces aménagements au terme de 25 ans (une génération humaine), sur l'utilisation du sol, les productions en année moyenne, la dégradation des sols et de la végétation.

(1) Cette intervention est extraite d'un article intitulé : « Dynamique de Systèmes Écologiques de la zone aride. Application à l'aménagement sur des bases écologiques de la Tunisie Présaharienne », par FLORET, LE FLOC'H, PONTANIER et ROMANE, dans *Acta Œcologica, Œcol. Applic.*, 1981, vol. 2, n° 3, p. 195-214.

interventions des participants

S. HÉNIN : Pourquoi employer le labour dans des milieux aussi fragiles ? Il existe actuellement d'autres méthodes qui n'auraient peut-être pas les mêmes inconvénients.

C. KILIAN : Le rôle des labours dans la dégradation des sols serait à préciser. De nombreux résultats expérimentaux menés par les Instituts de Recherches agronomiques ont montré que *les labours, lorsqu'ils étaient bien menés* et bien inscrits dans un système de culture approprié, n'étaient pas un facteur forcé de dégradation ; ils interviennent aussi de façon positive dans l'amélioration des réserves hydriques du sol.

Sys : Il me semble qu'on ne peut pas oublier que le labour représente une technique pour favoriser la conservation en eau de ces sols.

P. ROEDERER : La D.G.R.S.T. (Comité L.A.T.) finance actuellement dans le sud Tunisien, un programme mené par l'O.R.S.T.O.M. sur la définition des techniques culturales à employer dans ces zones.

G. AUBERT : L'exposé que nous venons d'entendre, avec tous les éléments que nous avons vus, a très bien montré l'intérêt d'une étude détaillée du milieu à mettre en valeur, suivant le mode des systèmes écologiques.

Parmi les éléments essentiels permettant de les définir, tout ce qui, dans ces zones « arides » se rattache au bilan de l'eau dans ces sols, à sa circulation, à ses conditions d'absorption par la végétation, prend une particulière importance.

Grâce à l'utilisation des matrices de transition, à la suite d'observations précises et chiffrées sur la transformation du milieu sous l'influence de quelques modifications soigneusement programmées, nous pouvons connaître son évolution finale, dans un laps de temps donné, choisi ici de 25 ans.

Parmi les leçons méthodologiques à tirer de cette recherche, il en est deux qui paraissent primordiales :

1. Dans ces régions semi-arides en particulier, seul un aménagement intégré permettant une utilisation maximale et parfaitement adaptée de toute l'eau que le sol reçoit, peut se concevoir ; le mode d'utilisation étant lié à la fois aux conditions thermiques et hydriques atmosphériques, ainsi qu'aux caractéristiques du sol y compris sa position topographique et géomorphologique, aucun plan de mise en valeur ne peut être utilisé, s'il ne reflète l'ensemble de tous ces paramètres.

2. Cet aménagement intégré ne peut être le résultat du travail que d'une équipe parfaitement interdisciplinaire.

The occurrence, distribution, classification and management of laterite and lateritic soils

S. P. RAYCHAUDHURI, India

Chief Agronomist, Shriram Khad Programme, Guru Angad Bhawan, Fifth floor, 71, Nehru Place, New Delhi-110019, India

The term laterite was originally suggested by BUCHANAN (1807) as a name for highly ferruginous deposits first observed in Malabar in India. BUCHANAN described a material that was soft enough to be cut with a knife when *in situ* but hardened in exposure; it was being quarried to make bricks, and he derived the term from the latin *later*, a brick. STEPHEN (1961) revisited BUCHANAN's type site to find that the rock-like iron stone was being packed with pickaxes—not with knife. The property of hardening of such material on exposure to the atmosphere was for some time taken as a criterion of laterite. FERMOR (1911) suggested the use of the term only for soft material that could be cut into bricks. Great interest in the study of laterites developed because of the possible use of laterite as an ore for aluminium (HOLLAND, 1903) and in some cases, for manganese (FERMOR, 1911). WADIA (1945) classified laterite as 'High level' and 'Low level' laterites. High level laterites never occur on situation below 2,000 ft. (Bombay, Deccan, Nilgiri mountains). Low level laterites are in most cases of secondary origin and are derived from the high level laterites and recombined after deposition in the valleys or plains. Low level laterite is thus mainly of detrital origin.

KRISHNAN (1934) reported the formation of laterite from Khondalite, a name introduced by T. L. WALKER to designate certain crystalline schists consisting of quartz, garnet, sillimanite and graphite, which he mapped in Kalahandi State, Bihar and Orissa. Fox (1936) during his visit to Malabar

reported that all the laterite occurrences seen by him in Malabar, Kanara and Shimoga were associated with granite rocks below them and could be taken as always having been formed from such acid rocks and passed down into them through a zone of Kaolinised rock. He has further reported that in the Nellore quarries laterite overlies gneissic rocks. DHARESHWAR (1942) reported that laterite in Kanara rests mainly on trap which is one of the basalts.

SATYANARAYANA and THOMAS (1961) have studied the field characteristics of laterites of Malabar and South Canara. According to them, the characteristic features of laterites are the colour, consistency, structure, form and depth of the different horizons. They found that the slaglike crumbly or honeycomb structures were confined to the surface or mature horizons, and the typical laterite quarried for building purposes had a vermicular or vesicular structure. VAIDHYANATHAN (1962) described two types of laterites in the Nellore area: (i) *in situ* laterites quarried as building stone which is porous, pitted and clay like, usually yellowish brown in colour with slight pinkish tinge, and (ii) a second type undoubtedly of recent age made up of pebble gravels, shining reddish brown in colour and occasionally mixed with small pieces of vein quartz and yellowish sand. The iron occurs mainly as goethite, haematite and amorphous ferric oxides.

Laterite is usually reddish brown (typically 5 YR 5/6), has a moderately high density 2.5-3.6; usually contains secondary aluminium; may contain quartz and kaolinite but low in other forms of

silica; exchangeable bases and humus are absent.

An iron-rich mottled clay which hardens on exposure to air, or repeated wetting and drying, is called *soft laterite*.

U.S.D.A.-7th approximation has defined a new word *plinthite* as a sesquioxide rich clay which either changes irreversibly to hard pans on repeated wetting and drying or is the hardened relics of the soft red mottles.

Latosol was defined by KELLOG (1949) as a term to comprehend all the zonal soils in tropical and equatorial regions having their dominant characteristics associated with low silica-sesquioxide ratios of clay fractions, low base exchange capacities, low activities of the clay, low content of most primary minerals, low content of soluble constituents, a high degree of aggregate stability and some red colour. It is a collective term for zonal soils called lateritic soils.

Within the latosols there are four major groups:

- (i) Ferruginous soils,
- (ii) Ferrallitic soils,
- (iii) Basisols (a group of soils derived from basic rocks), and
- (iv) Humic latosols.

CLASSIFICATION OF LATERITES

Anthony YOUNG (1976) has distinguished the following main types and sub-divisions of laterite:

(1) **MASSIVE LATERITE:** Possesses a continuous hard fabric, sub-divided into:

- (a) Cellular laterite—Cavities are approximately rounded.
- (b) Vesicular laterite—Cavities are predominantly tubular.

(2) **NODULAR LATERITE:** Consists of individual approximately rounded concretions (also called *pisolithic laterite*) sub-divided into:

- (a) Cemented nodular laterite—Individual concretions can be seen but are strongly joined together by the same iron-stone material.
- (b) Partly cemented nodular laterite.
- (c) Non-cemented nodular laterite—Concretions from over 60 per cent by weight of the total soil.
- (d) Iron concretions—Concretions are separated by soil—but forms less than 60 per cent by weight of the total horizon.

(3) **RECEMENTED LATERITE:** Contains fragments of massive laterite or ferruginized rock, broken and wholly or partly cemented.

(4) **FERRUGINIZED ROCK:** Rock structure is still visible, but with substantial isomorphous replacement by iron.

(5) **SOFT LATERITE:** Mottled iron-rich clay which hardens irreversibly on exposure to air or to repeated wetting and drying.

OCCURRENCES AND CHARACTERISTICS

Laterite and lateritic soils are formations peculiar to India and some other tropical countries with intermittently moist climate. In India they cover a total area of about 248,000 sq. kilometres. Laterites are specially well developed on the summits of hills of the Deccan, Karnataka, Kerala, Madhya Pradesh, the Eastern Ghat regions of Orissa, Maharashtra, Malabar and parts of Assam. All laterite soils are very poor in lime and magnesia and deficient in nitrogen. Occasionally the phosphate content may be high, probably present in the form of iron phosphate but potash is deficient. There is occasionally a higher content of humus.

In Tamil Nadu, there are both *high level* and *low level* laterites which are formed from a variety of rock materials. The soils are rich in plant nutrients. The higher the elevation, the more acidic the soils are. In Coorg, laterite appears sporadically almost all over the country.

In Maharashtra, laterites are found only in Ratnagiri and Kanara. The soils of Kanara are coarse, poor in lime and P_2O_5 but fairly good in organic matter and nitrogen and potash. In the soils of Ratnagiri, coarse material is found in large quantities. These are rich in plant food constituents, except lime. In Kerala, both high level and low level laterites are met with; high level laterites growing plantation crops are rich soils because of their proper management. The laterites on lower elevations have a poor nutrient status.

The soils are generally poor in plant nutrients and organic matter. The laterite soils in Karnataka occur in the western parts of the districts of Shimoga, Hassan, Kadur and Mysore. All the soils are comparable to the laterites and to similar formations found in Malabar, the Nilgiris, etc., of the Tamil Nadu State. These soils are very low in bases like lime, due to severe leaching and erosion. These also are poor in phosphate.

In West Bengal, the area between the Damodar and the Bhagirathi is interspersed with some basaltic and granitic hills with a laterite capping. The soils of the region are differentiated into two distinct groups; to the first group belong the soils of Midnapur, Bankura, Burdwan and Birbhum. Bankura district is known to be located in the lateritic soil zone. The

contents of potash, phosphorus and nitrogen are also low. In Bihar, laterite occurs principally as a cap on the higher plateaus but is also found in fair thickness in some valleys. The laterites of Orissa are found largely capping hills and plateaus occasionally in considerable thickness. Large areas in Khurda are occupied by laterites, those of Balasore are gravelly and appear to be detrital. Two types of laterites have been distinguished in Orissa: (i) the laterite murum and (ii) the laterite rock. These types are also found to occur together.

FACTORS OF LATERITE FORMATION AND CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION

RAYCHAUDHURI and CHAKRAVORTY (1940) studied the influence of rainfall and altitude above sea level on the chemical composition of clay fractions of Indian red soils and lateritic soils and concluded that both annual rainfall and altitude give significant negative correlation with the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of the clay fractions of Indian lateritic soils.

RAYCHAUDHURI and MUKHERJEE (1942) studied the mineralogical composition of Indian red soils and lateritic soils and found iron oxide, zircon, tourmaline, staurolite, chlorite, hornblende, epidote, and rutile among the heavy fractions, while in the light fractions the minerals consisted of feldspars and quartz. ROY and LANDEY (1962) have found the occurrence of illitic mineral with some kaolinite and quartz in red and laterite soils of Mand watershed in Rajgarh district in Madhya Pradesh.

The leaching processes responsible for the removal of silica in the formation of lateritic soils also remove a large portion of the bases originally present in the rock and soil, thus having a residue rich in iron and aluminium and poor in potash and phosphoric acid. Alkali and alkaline earth bases do not, as a rule, exceed 1.0 per cent. As part of the phosphorus compounds in the soils are insoluble, the mobility of phosphorus is hindered and it accumulates in the surface horizon. Nitrogen deficiency is not so much as that of potash and phosphoric acid. The nitrogen content of laterites of Goa is between 0.01 and 0.1 per cent while that of Assam soils averages 0.1 per cent.

To summarise, the laterite soils are poor in available nutrients of phosphorus, potassium and calcium. The nitrogen content generally varies from 0.03 per cent to 0.06 per cent. The pH ranges from 4.8 to 5.5 and base exchange capacity is low. Consequently, they give a high response to application of lime and potash.

MANAGEMENT

Cultivators' field trials have been conducted on paddy. The response to combination of nitrogen, phosphorus and potassium was quite high in Kerala, Karnataka and Chhota Nagpur region of Bihar, Orissa and Assam. At Kharagpur, potato showed small response to nitrogen but the response was appreciable when a balanced dose of nitrogen, phosphorus and potassium was applied. Green gram and gram gave significant increased yields by application of phosphate but little response to nitrogen and potassium or their combination. Under lowland conditions, bronzing and root rot occur which can be corrected by the addition of lime, nitrogen, phosphate and potash. In lowland laterites, iron and manganese often causes toxicity, which results in bronzing and root rot due to reduction of ferric into ferrous oxide and of tetravalent manganese to the divalent form. The addition of lime corrects this condition and the uptake of nitrogen and phosphate becomes normal. The dose of lime ranges from 2470 kg/hectare to 3700 kg/hectare. In most of the laterite regions, the annual rainfall exceeds 177.8 cm and heavy erosion occurs every year.

The agricultural value of soils with laterite depends largely on the thickness of the overlying soil. With laterite at more than about 50 cm depth, soils can be moderately productive for paddy and other cereal crops and for plantation crops like rubber.

Ferruginous soils are suited to annual crops, like maize, tobacco, cotton and yams. Ferruginous soils usually give good response to fertilizers. There is a substantial erosion hazard on ferruginous soils, particularly because they often occur on slopes. Conservation works and the maintenance of a good organic matter status are necessary.

Both physically and in respect of nutrients, weathered ferrallitic soils are poor for agriculture. The compact B horizon inhibits root penetration. Moisture retention is relatively low. The organic matter content is low. Short fallowing (with a fallow: cultivation ratio of at least 1:1) is necessary, together with green manuring, a rotation that includes legumes, and application of manures or fertilizers.

Humic latosols are freely to imperfectly drained acid soils, relatively rich in organic matter, which occur at high altitudes. These occur at altitudes above 1500 m. Nitrogen levels are high, but leaching results in potash deficiency. Phosphates suffer from fixation under the strongly acid conditions. Where depth is sufficient the soils are suitable for perennials, tolerant of acidity but requiring lower temperatures and free drainage, such as tea, coffee and tung.

REFERENCES

- BUCHANAN (F.), 1807. — A journey from Madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar, Vol. 2, 436-60, Rast-India Co. London.
- DHARESHWAR (S. S.), 1942. — Indian Forester, 68, 315.
- FERMOR (L. L.), 1911. — Geol. Mag. 8, 454, 507.
- FOX (C. S.), 1936. — Rec. Geol. Survey, India, 69, 389.
- GIDIGASU (M. D.), 1976. — Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, pp. 1-554.
- HOLLAND (T. H.), 1903. — The constitution, origin and dehydration of laterite, Geo. Mag. 10, 59.
- KELLOGG (C. E.), 1949. — Preliminary suggestion for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. Commonwealth Bur. Soil Sci. Tech. Common. 46, 76-85.
- KRISHNAN (M. S.), 1934. — Rec. Geol. Survey, India, 68, 392.
- MAIGNIEN (R.), 1966. — Review of Research on Laterites, Nat. Resour. Res. U.N.E.S.C.O. 4.
- PRESCOTT (J. A.) and PENDLETON (R. L.), 1952. — Commonwealth Agr. Bureau, Farnham Royal, Bucks.
- RAYCHAUDHURI (S. P.) and CHAKRAVORTY (J. N.), 1940. — Indian J. Agric. Sci. 10, 252.
- RAYCHAUDHURI (S. P.) and MUKHERJEE (K. C.), 1942. — Indian J. Agric. Sci. 12, 323.
- ROY (B. B.) and LANDEY (R. J.), 1962. — Indian J. Agric. Sci., 32, 294.
- RAYCHAUDHURI (S. P.), 1963. — Land Resources of India, Vol. 1. Indian Soils. Their Classification, Occurrence and Properties, New Delhi.
- RAYCHAUDHURI (S. P.) and GOVINDA RAJAN (S. V.), 1971. — Soil Genesis and Classification, Review of Soil Research in India, Ind. Soc. Soil Sci. 107-36.
- SATYANARAYANA (K. V. S.) and THOMAS (P. K.), 1961. — J. Indian Soc. Soil Sci. 9, 107.
- STEPHENS (C. G.), 1961. — Laterite and the type locality, Angadipuram, Kerala, India J. Soil Sci. 12, 214-17.
- VAIDHYANATHAN (R.), 1962. — Curr. Sci. 3, 231.
- WADIA (D. N.), 1945. — J. Scient. Ind. Res. 3, 354.
- YOUNG (Anthony), 1976. — Tropical soils and soil survey, Cambridge Geographical Studies, No. 9, Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, Melbourne, pp. 1-468.

La simulation mathématique

Une méthode d'étude des sols salés

Michel RIEU

Pédologue O.R.S.T.O.M. Mission O.R.S.T.O.M. en Bolivie, Casilla 1199, Cochabamba, Bolivie

RÉSUMÉ

Une brève évocation des principes de la simulation mathématique du comportement physico-chimique des sols salés ainsi qu'une rapide revue bibliographique sont présentées. A titre d'exemple, la simulation de l'infiltration d'une petite pluie est analysée.

ABSTRACT

The principles of the mathematical simulation of the physico-chemical processes in saline soils and a short survey of the most important recent works are presented. As an exemple, the simulation of a little rain infiltration is analysed.

RESUMEN

Se presentan los aspectos básicos de la simulación matemática de la evolución físico-química de los suelos salinos y los principales estudios recientes al respecto. El ejemplo de la simulación de la infiltración de una pequeña lluvia es analizado.

La plupart des processus de la pédogenèse se développent trop lentement pour que nous puissions les appréhender autrement qu'en observant leurs effets sur la morphologie des sols.

Le phénomène de la salinisation des sols des zones arides, par contre, peut s'effectuer beaucoup plus rapidement : c'est à l'échelle de l'année que l'on peut constater l'accumulation des sels dans le sol,

la détérioration de sa structure et l'altération de ses argiles. Suivre de près et bien saisir le fonctionnement des mécanismes responsables de l'évolution des sols salés est donc une opération possible.

Mais ce qui est source de connaissances pour le pédologue est aussi cause de préoccupation pour l'agronome qui sait bien qu'une fausse manœuvre peut compromettre définitivement le fragile équilibre

d'un sol situé dans un milieu hostile. Dans des régions où la mise en place d'une infrastructure d'irrigation et de drainage est souvent très onéreuse, la prévision du devenir des sols en matière de salinité est souvent une nécessité.

Ce n'est pas le hasard qui a donné naissance aux premiers modèles de simulation de la salinisation des sols en Arizona avec DUTT en 1962 et en Israël avec BRESLER en 1967.

1. LA DÉMARCHE DU MODÉLISATEUR

Ces premières tentatives procédaient d'une démarche restée inchangée jusqu'aux modèles perfectionnés d'aujourd'hui, comme ceux de BRESLER et DAGAN (1979) ou de KOVDA et SZABOLCS (1979) : à la suite de l'étude détaillée du comportement d'un sol, on cherche à le reproduire grâce à un ensemble de calculs exécutés à partir des paramètres du sol étudié et de ceux de son milieu naturel. Ces calculs définissent, en fonction du temps, les mouvements de l'eau dans le sol et les transferts des éléments qu'elle contient en solution.

Dans une deuxième étape, ils permettent d'établir, à intervalles de temps simulés réguliers et pour des strates de sol dont la superposition constitue le profil, l'état salin du sol. Cet état est défini par :

- la composition chimique de la solution du sol,
- le stock de sels cristallisés,
- la composition du complexe échangeable.

La validité des calculs est alors testée en reproduisant des processus réels, observés et mesurés sur le terrain. Une fois le « calage » du modèle réalisé, on procède à la simulation proprement dite, soit en faisant de la prévision à long terme, soit en se livrant à l'étude détaillée d'un mécanisme difficilement observable sur le terrain.

2. LE MODÈLE ET SON OBJET

Les modèles de simulation de l'évolution des sols salés sont donc de type convectif, basés sur la circulation des flux hydriques à travers un substrat poreux. Ils font en outre intervenir le calcul de l'équilibre thermodynamique entre une solution d'électrolytes et une masse minérale, ainsi que celui de l'échange de cations entre cette même solution et le complexe absorbant. L'analyse mathématique de ces mécanismes est complexe mais les principes en sont connus et la puissance de calcul de l'ordinateur permet d'en venir à bout.

Bien que la mise en équations de l'évolution d'un sol représente une abstraction, réalisée au prix d'approximations nombreuses, le sol lui-même intervient aux trois étapes du modèle : par ses caracté-

ristiques hydrauliques, conductivité hydraulique et diffusivité, qui sont la base de l'étude des flux hydriques, par sa composition minéralogique et les propriétés de ses argiles, dont la connaissance est indispensable au calcul de l'état salin du sol. La mesure, sur le terrain ou au laboratoire, de ces données ainsi que l'évaluation des paramètres agrométéorologiques du milieu sont souvent délicates mais doivent être effectuées avec la plus grande précision possible : la validité des calculs de simulation sera toujours fonction de la qualité des données initiales.

Depuis 15 ans, les différents aspects des modèles de simulation des sols salés ont fait l'objet de très nombreuses études qui ont permis de perfectionner tant l'approche théorique des mécanismes que la mesure des paramètres du sol. Je citerai en particulier les travaux de DUTT, TANJI, PAUL, TERKELTOUB *et al.* (1966, 1967 a, 1967 b, 1971, 1972 a, 1972 b, 1972 c); BIGGAR, NIELSEN, WARRICK *et al.* (1967, 1971, 1972, 1973, 1976, 1977); BRESLER, DAGAN, HANKS *et al.* (1969 a, 1969 b, 1973, 1975, 1979); STAPLE (1969); HILLEL et GARDNER (1970), OSTER et MC NEAL (1971); SAWHNEY, STARR et PARLANC (1974, 1976).

Les publications en langue française, de leur côté, tiennent une place de haut niveau : FEODOROFF (1969, 1973), VACHAUD, DAHAN, ROYER, VAUCLIN, GAUDET *et al.* (1967, 1971 a, 1971 b, 1972, 1974, 1976, 1977), ont réalisé des études fondamentales sur la dynamique de l'eau et les propriétés hydrauliques des sols. Avec les travaux de FRITZ, DROUBI, GAC, DOSSO, TARDY *et al.* (1975, 1976 a, 1976 b, 1976 c, 1976 d, 1977, 1980) nous disposons de modèles très élaborés pour la simulation de l'équilibre des solutions au contact d'une masse minérale. Les études de LAUDELOUT, DUFEY, CHATTAOUI, *et al.* (1965 a, 1965 b, 1968, 1970, 1977 a, 1977 b, 1979) sur la thermodynamique des réactions d'échange et la mesure des coefficients de sélectivité nous donnent enfin le moyen de simuler les équilibres d'échange.

3. EXEMPLE DE SIMULATION MATHÉMATIQUE

A l'O.R.S.T.O.M. aussi, nous travaillons à la mise au point d'un modèle mathématique permettant de simuler la salinisation et l'alcalinisation du sol, sous végétation naturelle ou culture irriguée.

C'est aussi un modèle de type convectif, très proche de celui publié par DUTT en 1972, mais d'une écriture plus simple afin que des non-spécialisés puissent l'utiliser sans trop de difficultés (RIEU, 1978). Il est encore incomplet : sous sa forme actuelle, il permet seulement de rendre compte de l'évolution de la teneur en eau et de la composition chimique brute de la solution du sol. Le double volet de calculs

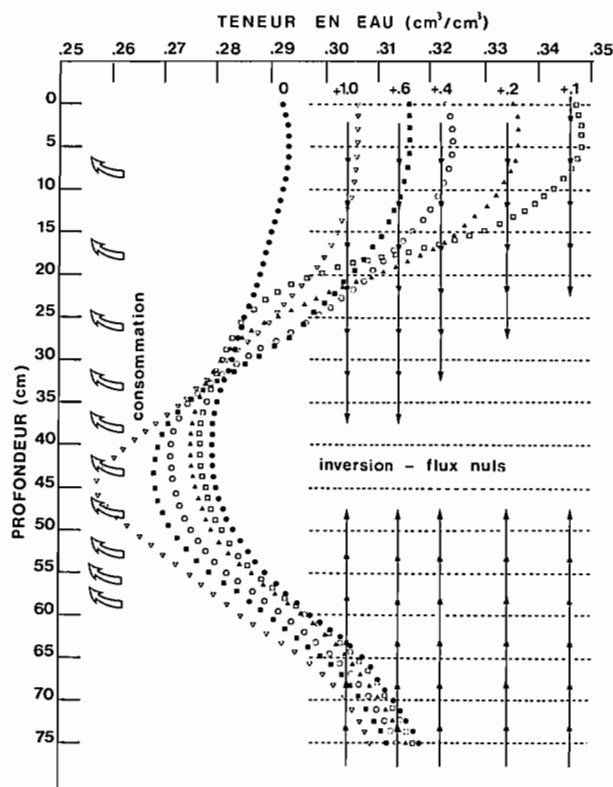


Fig. 1. — Simulation de l'infiltration d'une pluie de 2,6 mm (Polders de Bol). +.1; +.2; +.4; +.6; +1.0 : respectivement 0,1; 0,4; 0,6 et 1,0 jour après la pluie.

permettant de traiter l'équilibre thermo-dynamique de cette solution avec le sol lui-même n'est pas encore intégré au programme.

Toutefois, l'on peut déjà simuler le comportement hydraulique du sol pendant une année reproductible, en prenant en compte, pour chaque demi-heure de temps simulé en moyenne, tous les événements agronomiques ou climatiques qui peuvent survenir, aussi infimes soient-ils (Programme TRASOL; RIEU, 1980).

L'exemple présenté ici concerne une petite pluie de 2,6 mm tombant sur les polders de Bol, sur la rive N.-E. du lac Tchad pendant la culture du coton. Le sol est meuble et très perméable jusqu'à environ 50 cm de profondeur. Au-dessous, sa compacité augmente et sa conductivité hydraulique est beaucoup plus faible.

Trois faits, prévisibles mais difficilement observables sur le terrain pour un apport d'eau aussi faible, sont précisés dans le temps et l'espace par les calculs de la simulation (fig. 1) :

(a) La pluie n'affecte que les 35 premiers cm du sol :

— Le front d'humectation atteint 20 cm de profondeur, 0,1 jour (2 h 24') après l'apport d'eau, 30 cm au bout de 0,4 jour (9 h 36') et enfin la profondeur maximum de 35 cm après 0,6 jour (14 h 24').

— On note que, pendant que le front d'humectation se propage en profondeur, les 20 cm supérieurs se dessèchent progressivement.

(b) Il ne se passe rien que de très normal au-dessous de 50 cm. En raison de la consommation d'eau de la végétation, le sol se dessèche régulièrement, mais très lentement, du fait de la faible conductivité hydraulique de la partie inférieure du sol.

(c) On distingue nettement une zone où les flux changent de sens et s'annulent. (on a considéré comme négligeables les flux inférieurs à 0,1 cm/jour, soit 0,1 mm/0,1 jour, en valeur absolue).

— L'emplacement de la zone de flux nul traduit la morphologie du sol simulé : les flux descendants traversent rapidement la partie supérieure du sol et viennent buter contre la partie inférieure qui fonctionne indépendamment comme une mèche à partir de la nappe phréatique située 1,5 m plus bas.

— La zone de flux nul traduit aussi un fait agronomique : en raison de la compacité des horizons inférieurs, le système racinaire des cotonniers a tendance à se développer à la limite entre les deux niveaux, vers 50 cm de profondeur.

Or, à partir de 0,6 jour après l'apport d'eau, les flux calculés à 40 et 45 cm de profondeur sont strictement nuls. On notera qu'à ce niveau, la teneur en eau est alors devenue inférieure à $0,27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$: c'est le point de flétrissement mesuré pour le sol étudié, qui est évidemment atteint d'abord là où la consommation en eau est la plus élevée. Or le texte du programme de calcul ne contient aucune instruction tendant à annuler les flux si la teneur en eau est inférieure au point de flétrissement.

Les calculs de simulation confirment ainsi qu'au-delà de pF 4,2 il n'y a plus d'échange d'eau sous forme de flux hydriques : on entre alors dans le domaine de la diffusion et de la vaporisation.

Enfin, l'existence, au sein du profil, d'un niveau desséché où confluent les solutions provenant de la surface et de la nappe laisse prévoir une accumulation de sels à moyenne profondeur. Il suffit de creuser un profil sur les polders pour le constater à l'œil nu.

Ainsi un modèle de simulation permet non seulement de prévoir à long terme le degré de salinité des sols d'un périmètre irrigué mais il facilite aussi des études détaillées à l'échelle du profil.

Conclusion

La modélisation est-elle la solution d'avenir pour l'étude des sols salés ? Certes, les résultats obtenus sont prometteurs. Mais réduire un sol, dont la variabilité latérale ne peut être négligée, à une série d'équations est tout de même une opération hasardeuse.

Sans doute s'oriente-t-on actuellement vers l'analyse statistique des paramètres des sols dont on envisage la simulation (BRESLER et DAGAN, 1979 ; BIGGAR et NIELSEN, 1976 ; NIELSEN *et al.* 1973).

Mais on ne pourra pas aller très loin dans cette direction : à quoi bon concevoir des modèles très élaborés si l'on ne dispose pas de moyens de mesure, sur le terrain et au laboratoire, à la hauteur des édifices de calcul que l'on construit ?

Enfin, l'on ne simulera bien que ce que l'on a bien observé. Loin d'être la panacée, les modèles de simulation de l'évolution des sols salés ne sont qu'un instrument d'étude et de prévision, précieux certes, mais qui sera toujours précédé par l'œil et le doigt du pédologue devant son profil.

interventions des participants

J. H. DURAND : Dans l'étude des sols salés, je n'ai pas entendu parler de l'origine des sels solubles. C'est important, car lorsqu'un aménagement a été réalisé, il serait désolant que les sels soient constamment renouvelés.

D^r HALLSWORTH : Le problème des sols salés d'Australie est étroitement associé à l'âge des surfaces où les sels se sont accumulés depuis de nombreuses années. La déforestation qui accompagne la mise en valeur entraîne une forte augmentation des quantités d'eau infiltrées dans le sol, qui vont entraîner les sels solubles vers les vallées, provoquant ainsi une salinisation. En Australie Occidentale, 150 000 ha ont été perdus sous l'effet de ce processus.

Un autre problème est celui de l'affleurement de couches géologiques salines sur les flancs des vallées. Il conduit à la formation de « measles » (= rougeole), taches de sols salés sur lesquelles aucune plante cultivée ne peut se développer, et qui sont fréquemment le point de départ du ravinement.

RÉPONSE DE G. AUBERT : Dans les régions d'Afrique du Nord où les sols salsodiques ont été étudiés, il existe des situations analogues à la 2^e qui vient d'être indiquée par le D^r HALLSWORTH : dans les parties moyennes sinon sommitales des collines bordant des vallées comme le Bas-Chelif, la Moyenne-Medjerda, etc., se trouvent des niveaux de marnes salées, qui, directement, en fournissant une partie des alluvions de la vallée, ou indirectement, en livrant du sel aux oueds qui y prennent leur source, enrichissent en éléments salins les sols et les nappes phréatiques de ces zones basses.

J. VIEILLEFON : Il faut insister sur l'intérêt du dialogue entre les concepteurs des modèles de simulation et les pédologues confrontés aux techniques de mesure sur le terrain.

En particulier, il convient de dimensionner les compartiments des modèles à l'échelle des méthodes de contrôle paramétrique utilisées.

M. GIRARD : Vous avez parlé de durée de calculs de 5 heures. Quels sont les ordinateurs utilisés ?

Réponse : Il s'agit de petits ordinateurs de 24 K de mémoire centrale.

G. AUBERT : Malgré tout ce qui a été déjà réalisé comme recherches sur ces sols salsodiques et dont le dernier état vient de nous être exposé par C. CHEVERRY et M. RIEU, ainsi qu'au cours de la discussion qui a suivi, certains points doivent encore être approfondis, me semble-t-il. J'en vois trois : la structure des sols à alcali, l'influence édaphique des sols salsodiques et les méthodes à utiliser pour leur amélioration.

1. *Structure des sols à alcali.*

Trop souvent, nous savons mal la reconnaître, ainsi que ses variations aux différentes périodes de l'année; il nous faut étudier plus en détail l'influence des divers sels, des types d'argile, sur le plan minéralogique et sur celui de leur environnement cationique, et des différentes matières organiques qui peuvent s'y développer, comme cela a été fait en Tunisie par le Dr GALLALI. Cela nécessite des observations de terrain, en de nombreux points, comme des expérimentations en parcelles et au laboratoire. Une meilleure compréhension de la dynamique structurale de ces sols concourra certainement à l'établissement de modèles mathématiques encore plus proches de la réalité.

2. *Influence édaphique des sols salsodiques.*

Elle est relativement bien connue, grâce aux travaux de nombreux agronomes, phytosociologues et physiologistes, vis-à-vis des principales cultures, encore qu'elle puisse varier en fonction des conditions climatiques et que l'effet de la dégradation de la structure n'ait pas été très travaillé. Par contre, assez peu de recherches ont été consacrées aux modifications qu'ils provoquent dans l'activité de leurs micro-organismes et de leur mésafaune dont le rôle se révèle, de plus en plus, très important dans la dynamique des sols. Avec les nouvelles connaissances que nous avons sur la circulation des sels dans ces sols, en particulier à la suite de la mise au point de modèles par les professeurs LAUDELOUT et TARDY, KOVDA et SZABOLCS, par M. RIEU, et que nous obtiendrons sur l'évolution de leur structure et de leur influence édaphique, nous devrons pouvoir apporter plus de précisions dans la typologie de ces sols et dans leur classification.

3. *Amélioration des sols salsodiques.*

Les possibilités et modes d'utilisation d'amendements minéraux riches en Ca ou en Fe, ou même d'acide sulfurique et à un moindre degré d'amendements organiques sont assez bien connus (travaux des professeurs SZABOLCS et PETROSSIAN par exemple). Les méthodes de drainage ou d'assainissement par planches bombées nécessitent encore bien des recherches pour les adapter au mieux à chaque type de sols, en particulier dans le cas de sols salsodiques vertiques, très riches en argile du type des smectites, plus ou moins salés et alcalisés à faible ou moyenne profondeur.

Elles dépendent plus spécialement du type de sol, des sels qu'ils contiennent ainsi que de la nature, de la profondeur et des variations de leur nappe phréatique. Sur ce dernier point, les nouvelles méthodes de drainage expérimentées en U.R.S.S. — sous pression ou avec l'emploi de courant électrique — semblent devoir être essayées dans un plus grand nombre de cas, et, probablement propagées. Cette recherche sera mieux réalisée en coopération avec hydrologues et ingénieurs du génie rural que par les pédologues seuls.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1967. — Miscible displacement and leaching phenomena. In HAGAN (R. M.), HAISE (H. R.) and EDMISTER (T. W.), « Irrigation of agricultural lands » *Agronomy*, 11 : 254-274 (American Society of Agronomy, Madison, Wisc.).
- BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1976. — Spatial variability of leaching characteristics of a field Soil. *Water Resour. Res.*, 12 : 78-84.
- BRESLER (E.), 1967. — A model for tracing salt distribution in the soil profile and estimating the efficient combination of water quality and quantity under varying field conditions. *Soil Sci.*, 104 : 227-233.
- BRESLER (E.), KEMPER (W. A.), HANKS (R. J.), 1969. — Infiltration, redistribution and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 832-840.
- BRESLER (E.), 1973. — Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions. *Water Resour. Res.*, 9 : 975-986.
- BRESLER (E.), 1975. — Two-Dimensional transport of solutes during non-steady infiltration from a trickle source. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39 : 604-613.
- BRESLER (E.) and DAGAN (G.), 1979. — Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale : II. Applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 43 : 467-472.
- CHATTAGUI (T.), DUFÉY (J. E.), LAUDELOUT (H.), 1977. — Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la haute vallée de la Medjerda de Tunisie. *Sols de Tunisie*, 9 : 108-147.
- DAGAN (G.), BRESLER (E.), 1979. — Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale : I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 43 : 461-467.
- DAIAN (J. F.), VACHAUD (G.), 1971. — Méthode d'évaluation du bilan hydrique *in situ* à partir de la mesure des teneurs en eau et des succions. Trans. of Symposium on isotopes and radiation in soil-plant relationships. I.A.E.A. Vienne, 1971 : 649-668.
- Dosso (M.), 1980. — Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse Doct. Ing., Toulouse, 181 p.
- DROUBI (A.), 1976. — Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermo dynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et *Mém. Sci. Géol.*, 46, 177 p.
- DROUBI (A.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. — Équilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XIV : 13-38.
- DROUBI (A.), CHEVERRY (Cl.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. — Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad : Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology*, 17 : 165-177.
- DUFÉY (J. E.), PETIT (C.-M.), GOBLET (Y.), LAUDELOUT (H.), 1979. — Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau-électrolyte. *Ann. Agro.*, 30 : 53-62.
- DUTT (G. R.), 1962. — Prédiction of the concentration of solutes in soil solutions for soil systems containing Gypsum and exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26 : 341-343.
- DUTT (G. R.), TERKELTOUB (R. W.), RAUSCHKOLB (R. S.), 1972. — Prediction of gypsum and leaching requirement for sodium affected soils. *Soil Sci.* 114 : 93-103.
- DUTT (G. R.), SHAFER (M. J.), MOORE (W. J.), 1972. — Computer simulation model of dynamic bio-physico-chemical processes *in soils*. Univ. of Ariz., *Techn. Bul.* 196, Tucson 1972.
- FEODOROFF (A.), BALLIF (J. I.), 1969. — Étude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres. *Ann. Agro.*, 20 : 475-594.
- FEODOROFF (A.), GALULA (E.), 1973. — Conductivité hydrique d'un sol non saturé. *Science du Sol*, 3 : 163-175.
- FRITZ (B.), 1975. — Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et *Mém. Sci. Géol.*, 41, 152 p.
- GAC (J. Y.), DROUBI (A.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1977. — Geochemical behaviour of silica and magnesium during the evaporation of waters in Chad. *Chemical Geology*, 19 : 215-228.
- GAUDET (J.-P.), HEGAT (H.), VACHAUD (G.), WIERENGA (P.-J.), 1977. — Solute transfer, with exchange between mobile and stagnant water, through unsaturated sand. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 41 : 665-671.

- HANKS (R. J.), KLUTE (A.), BRESLER (E.), 1969. — A numeric method for estimating infiltration, redistribution drainage and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.*, 5 : 1064-1069.
- HILLEL (D.), GARDNER (W. R.), 1970. — Transient infiltration into crust topped profiles. *Soil Sci.*, 109 : 69-76.
- KOVDA (V. A.), SZABOLCS (I.), 1979. — Modelling of soil salinization and alkalization. *Agrokemia es Talajtan* 28 (Suppl.), 208 p.
- LAUDELOUT (H.), THOMAS (H. C.), 1965. — The effect of water activity on ion exchange selectivity. *J. Phys. Chem.*, 69 : 339-340.
- LAUDELOUT (H.), 1965. — A unified treatment of two ion-exchange formulations commonly used in soil science, in plant nutrient supply and movement. *Techn. Rep.*, ser. Mo 48, I.A.E.A., Vienne 1965 : 20-24.
- LAUDELOUT (H.), VAN BLADEL (R.), BOLT (G. H.), PAGE (A. L.), 1968. — Thermodynamics of heterovalent cation exchange reaction in a montmorillonite clay. *Trans. Faraday Soc.*, 64 : 1477-1488.
- LAUDELOUT (H.), 1970. — Cation exchange in soils. In *Sorption and Transport Processes in Soils, S.C.J. Monogr.*, 37 : 33-39.
- LAUDELOUT (H.), DUFÉY (J. E.), 1977. — Analyse numérique des expériences de lixiviation en sol homogène, *Ann. Agron.*, 28 : 65-73.
- NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.), COREY (J. C.), 1972. — Application of flow theory to field situations. *Soil Sci.* 113 : 254-263.
- NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.) and ERH (K. T.), 1973. — Spatial variability of field measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42 : 215-260.
- OSTER (J. D.), Mc NEAL (B. L.), 1971. — Computation of soil solutions composition variation with water content for desaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35 : 436-442.
- PAUL (J.-L.), TANJI (K. K.), ANDERSON (W. A.), 1966. — Estimating soil and saturation extract composition by a computer method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30 : 15-17.
- RIEU (M.), 1978. — Éléments d'un modèle mathématique de prédiction de la salure dans les sols irrigués. Application aux polders du Tchad. Thèse Doct. Spec. Toulouse, 134 p.
- RIEU (M.), 1980. — Simulation mathématique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols irrigués. Initiations et Documents Techniques O.R.S.T.O.M. (sous presse).
- ROYER (J.-M.), VACHAUD (G.), 1974. — Détermination de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des suctions. *Bull. Sciences Hydrol.*, 19 : 319-336.
- SAWHNEY (B.), PARLANGE (J. Y.), 1974. — Two dimensional water infiltration, a trench in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38 : 867-871.
- STAPLE (W. J.), 1969. — Comparison of computed and measured moisture redistribution following infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 840-847.
- STARR (J. L.), PARLANGE (J. Y.), 1976. — Solute dispersion in saturated soil columns. *Soil Sci.*, 121 : 364-372.
- TANJI (K. K.), DUTT (G. R.), PAUL (J.-L.), DONEEN (L. D.), 1967. — Quality of percolating water : II. A computer method for predicting salt concentrations in soils at variable moisture contents. *Hilgardia*, 38 : 307-318.
- TANJI (K. K.), DONEEN (L. A.), PAUL (J.-L.), 1967. — Quality of percolating water. III : Prediction of the quality of waters percolating through stratified substrata, as predicted by computer analyses. *Hilgardia*, 38 : 319-347.
- TANJI (K. K.), DONEEN (L. D.), FERREY (G. V.), AYERS (R. S.), 1972. — Computer simulation analysis on reclamation of salt-affected soils in San Joaquin Valley, California. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36 : 127-133.
- TARDY (Y.), GARRELS (R.), 1976. — Prediction of Gibbs energies of formation. I. Relationships among Gibbs energies of formation of hydroxydes, oxydes and aqueous ions. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, 40 : 1051-1056.
- TERKELTOUB (R. W.), BABLOCK (K. L.), 1971. — A simple method for predicting salt movement through soil. *Soil Sci.*, 111 : 182-187.
- VACHAUD (G.), 1967. — Determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soils from an analysis of transient flow data. *Water Resour. Res.*, 3 : 697-705.
- VACHAUD (G.), THONY (J. L.), 1971. — Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water content. *Water. Resour. Res.*, 7 : 111-127.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), WAKIL (M.), KHANJI (D.), 1972. — Effects of air pressure during water flow in an unsaturated, stratified vertical column of soil. *Proc. of 2nd Sympos. IAHR-ISSS, Univ. of Guelph, Ontario, Canada 1* : 357-377.
- VAUCLIN (M.), KHANJI (D.), VACHAUD (G.), 1976. — Étude expérimentale et numérique du drainage et de la recharge des nappes à surface libre avec prise en compte de la zone non saturée. *J. Mec.*, 15 : 307-348.
- WARRICK (A. W.), BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1971. — Simultaneous solute and water transfer for an unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, 7 : 1216-1225.
- WARRICK (A. W.), MULLEN (G. J.), NIELSEN (D. R.), 1977. — Prediction of the soil water flux based upon field measured soil water properties. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 41 : 14-19.

Un service offert aux pédologues :
Représentation automatique élaborée d'un caractère spatial

Anne-Marie AUBRY, Yves BOULVERT et Patrick SECHET
O.R.S.T.O.M., Services Scientifiques Centraux, 70-74, route d'Aulnay, (F) 93140 Bondy

RÉSUMÉ

L'établissement de cartes thématiques constitue un travail que les pédologues doivent fréquemment réaliser. L'objectif poursuivi dans l'article ci-après est de présenter un processus d'obtention de tracés automatiques, comparables à ceux dressés manuellement, à la fois économiques et rapides. L'exposé détaillé de la méthode utilisée répond au souci de divulguer les quelques fondements, parfois mal connus, de la cartographie assistée par ordinateur. Son étude n'est toutefois pas essentielle à l'utilisation de ce service dont le mode d'emploi fait l'objet de la dernière partie de cette note.

ABSTRACT

Thematic cartography is one of the activities supervised by the soil scientist. This paper presents an automated procedure for mapping a bivariate continuous function.

Contours are comparable to those drafted manually. Low-cost line-printer output occurs almost immediately after data are keyed-in. The detailed algorithm (from E. DAVAUD, 1974), is presented in order to favour the dissemination of basic principles of automated cartography. This chapter may be overlooked by readers who are more interested by the actual output.

RESUMO

A elaboração de mapas temáticos é uma tarefa freqüente para os pedólogos. A finalidade deste artigo é de apresentar um processo de obtenção de traçados automáticos, comparáveis às estabelecidos na mão, ao mesmo tempo econômicos e rápidos. A explanação detalhada do método usado foi realizada no objetivo de vulgarização dos princípios básicos, as vezes pouco conhecidos, da cartografia assessorada pelo computador.

Entretanto o seu estudo não é essencial para o uso desse serviço, cujo manual do usuário consta da última parte deste relatório.

Introduction

En tant que scientifiques naturalistes, de nombreux chercheurs de l'Office sont amenés à dresser des cartes, que ce soit l'objectif de leurs travaux, ou simplement une étape utile dans leurs recherches. Les pédologues, quant à eux, sont concernés par la cartographie à deux niveaux : l'élaboration de la carte pédologique proprement dite — qui reste une fonction essentielle — mais aussi le tracé de cartes thématiques diverses, nécessaires à des études locales, intégrées ou non, dans le cadre d'une action régionale pluridisciplinaire.

L'établissement d'une carte à partir d'un ensemble de relevés ponctuels constitue une tâche qui se prête, sous certaines hypothèses, à une automatisation. La présente note rend compte de la méthode adoptée, élaborée à partir d'un programme de traçage automatique de cartes d'isovaleurs, dû à E. DAVAUD de l'Université de Genève (DAVAUD, 1975) et adapté au contexte scientifique de l'O.R.S.T.O.M.

La procédure interne de calcul consiste à générer une succession de grilles d'interpolation de plus en plus serrées, permettant de créer progressivement des valeurs interpolées complémentaires autour de valeurs observées. Au cours d'une étape, la valeur prise par le caractère en chaque nœud de la grille est calculée par interpolation locale à partir de l'ensemble des points les plus voisins (situés dans un cercle de rayon donné).

L'utilisation de toute méthode automatique présente les avantages de l'objectivité du tracé et de la rapidité d'exécution. La méthode retenue est en outre applicable quelle que soit la distribution spatiale des points connus et, d'autre part, son coût d'exploitation est très réduit.

La première partie de cet article est consacrée à la description de l'algorithme, définissant son domaine d'application et soulignant ses caractéristiques. La souplesse de la méthode est ensuite illustrée à la faveur d'un exemple simple pour lequel on a fait varier les divers paramètres dont on dispose. Une dernière partie précise les conditions d'accès au produit offert, en fonction de la situation de l'utilisateur potentiel vis-à-vis de ses moyens de calcul automatique.

1. MÉTHODE

De nombreuses méthodes ont été proposées pour la cartographie automatique d'une variable sur un domaine limité à partir d'un ensemble quelconque de données d'observations ponctuelles. Pour la plupart elles sont basées sur le calcul, par interpolation, de la valeur de la fonction en chaque

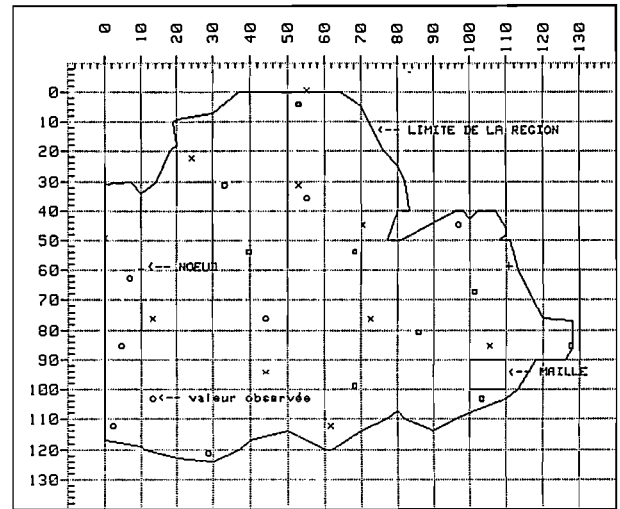


Fig. 1. — Quelques définitions : les points observés extrêmes, situés à l'intérieur de la région à étudier, fixent les dimensions maximales de la grille d'interpolation à maille carrée. La valeur de la fonction est alors calculée sur chacun des nœuds de cette grille, à partir des valeurs observées les plus proches du point considéré.

nœud d'une grille superposée à la région considérée (fig. 1).

La méthode présentée n'échappe pas à cette règle et possède, entre autres avantages, une remarquable souplesse d'utilisation qui devrait lui permettre de servir à la représentation des thèmes les plus divers, pourvu que les hypothèses initiales soient respectées.

1.1. Hypothèses fondamentales

Du point de vue formel, on s'intéresse dans cet article à une fonction z , définie et continue en tout point M , de coordonnées orthogonales (x, y) , d'un domaine D . On traduira en outre mathématiquement le fait que la surface représentative ne présente pas de variations brutales en supposant que les dérivées partielles des premiers ordres de la fonction sont également continues. Bien entendu ces conditions très restrictives peuvent être affaiblies, moyennant certaines précautions à l'emploi de la méthode dont l'étude dépasse le cadre de cet exposé.

En pratique le caractère à cartographier est connu en quelques points de mesure irrégulièrement distribués, sans exclure la possibilité d'existence de parties du domaine vides de données.

Le problème posé consiste donc à trouver une méthode d'interpolation d'une fonction à deux variables à partir d'un nombre limité de valeurs de

cette fonction. Le résultat obtenu pourra s'exprimer, soit graphiquement par le moyen d'une carte d'isovaleurs, soit encore numériquement par une distribution uniforme de valeurs calculées.

1.2. Diverses méthodes

La première méthode utilisable pour ajuster une surface sur un ensemble de points consiste à représenter celle-ci par une équation dont les paramètres sont calculés par la méthode des moindres carrés. Pour obtenir un bon ajustement il est nécessaire d'utiliser une équation dont le degré est d'autant plus élevé que la surface est supposée plus irrégulière. Corrélativement, dans les zones où l'on ne dispose pas de points observés, la fonction ainsi obtenue peut prendre des valeurs totalement inattendues.

Une autre technique consiste à décrire la surface avec une grille uniforme de valeurs interpolées à l'aide d'une fonction polynomiale ajustée localement. Si la maille de la grille est choisie suffisamment fine, la fonction obtenue représente une surface qui passe effectivement par tous les points observés. C'est par la procédure de calcul des valeurs du thème en chaque nœud de la grille que les méthodes diffèrent. Toutes néanmoins réalisent une sélection des points observés à utiliser pour l'interpolation locale, en pondérant ceux-ci en fonction de la distance qui les sépare du point à interpoler (BATCHA et REESE, 1964; DAVAUD, 1975; OJAKANGAS et BASHAM, 1964; PEUCKER, 1972).

La méthode mise au point par E. DAVAUD apparaît comme étant celle qui dispose de la plus grande souplesse d'utilisation et par conséquent convient le mieux à l'objectif visé.

1.3. Méthode retenue

Cette dernière méthode présente la particularité d'être itérative. L'algorithme génère en effet une succession de grilles dont la maille carrée est de plus en plus fine : en chaque nœud d'une nouvelle grille la valeur de la fonction est calculée tant à partir des points voisins initialement observés que des valeurs interpolées au cours d'une étape précédente.

Dans les autres méthodes étudiées, le choix d'un critère de sélection des points observés à prendre en compte pour le calcul en un nœud de la grille, impose un procédé de calcul différent pour les points « entourés » — ou non — d'observations.

Ici, lorsque le nombre de points de mesure rencontrés au voisinage d'un nœud est insuffisant, l'interpolation est simplement abandonnée, et la valeur en ce point sera calculée au cours d'une étape ultérieure.

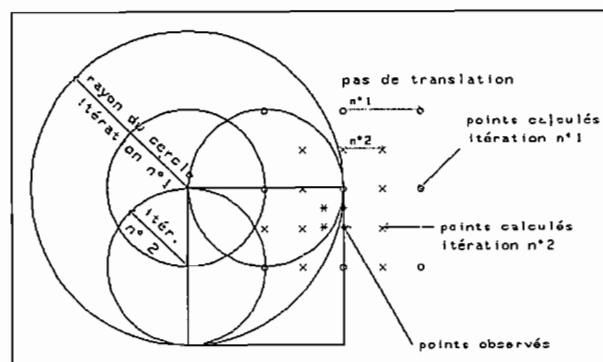


Fig. 2. — Exemple de propagation de l'interpolation locale : à partir de quatre points observés (*), on obtient les points représentés par le symbole 'o' au cours d'une première itération, puis lors d'une seconde itération, les points représentés par le symbole 'x'.

Une telle procédure permet de créer progressivement des valeurs complémentaires « réalistes » dans les zones où la densité des points de mesure initiaux est faible.

Le calcul de la valeur du paramètre z en chaque nœud des différentes grilles successives est réalisé en trois temps :

- sélection des données « voisines » qui serviront au calcul. Ne sont pris en compte que les points situés dans un cercle, dont le rayon est choisi proportionnel à la maille de la grille, centré sur le nœud considéré (fig. 2);

- les données ainsi sélectionnées sont pondérées suivant leur distance au centre du cercle, de manière à donner une influence plus importante aux points les plus voisins;

- on ajuste finalement à ces données un polynôme du premier degré en x et y (représentatif d'un plan), qui fournit la valeur de la fonction cherchée au nœud de la grille considéré.

Une fois l'interpolation réalisée (ou abandonnée) pour tous les nœuds de la grille, on définit une nouvelle grille en divisant chaque segment en deux. Lorsque les dimensions de la maille équivalent aux caractéristiques topographiques de l'imprimante de l'ordinateur, on obtient une valeur de la fonction en chaque emplacement physique de la carte à imprimer, qu'il suffit alors de remplacer par un symbole graphique pour aboutir au résultat recherché.

1.4. Quelques précisions

Le choix du rayon du « cercle de voisinage », égal à la dimension de la maille de la grille, est dicté par le

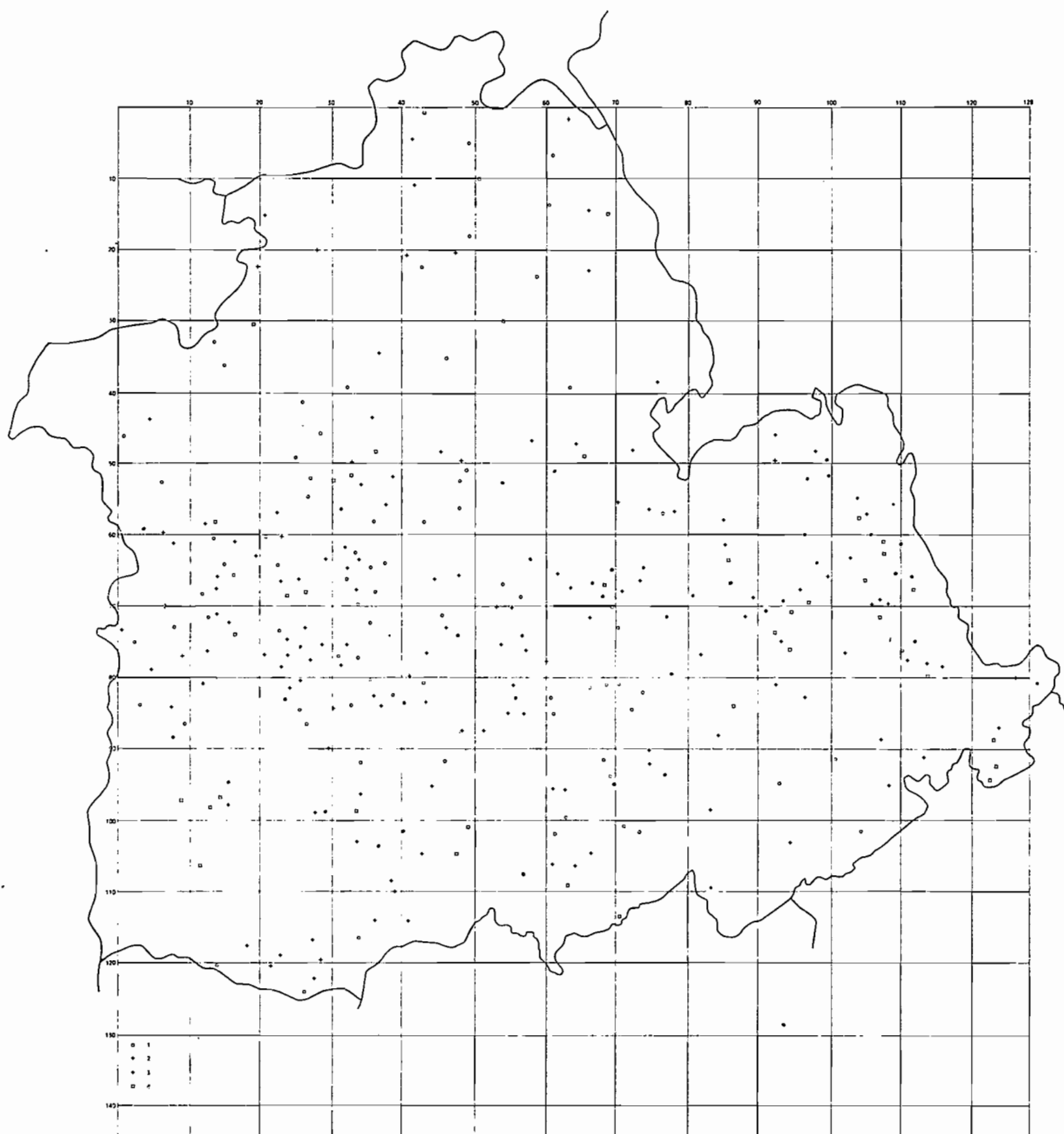


Fig. 3. — Jeu d'essai : localisation des observations.

souci de réduire progressivement — à chaque itération — l'influence des points les plus éloignés.

En effet, lors de la définition d'une nouvelle grille, ce rayon se trouve réduit de moitié et, par consé-

quent, la tendance générale de la surface n'est plus représentée que par les nœuds de la grille précédente, situés dans le cercle, à côté des observations initiales, jamais altérées.

Afin de couvrir l'ensemble des positions de la carte à l'issue de la dernière itération, la grille est déplacée selon les deux axes d'un pas qui varie en fonction de l'itération considérée.

Les points à prendre en compte sont affectés d'un poids inversement proportionnel au carré de la distance qui les sépare du nœud étudié, ce qui garantit la continuité des dérivées partielles de la fonction (PELTO, ELKINS, BOYD, 1968), tout en assurant une influence plus importante aux points situés plus près du nœud. Tous les points interpolés sont recalculés à chaque nouvelle itération; toutefois, ils ne sont pris en compte dans le calcul d'un nœud voisin que lors des itérations ultérieures.

En deçà de quatre points dans le cercle, l'interpolation locale est abandonnée, en raison de la dégénérescence de la méthode des moindres carrés.

Afin de supprimer la distorsion de la carte inhérente aux caractéristiques physiques de l'imprimante de l'ordinateur, une correction d'échelle est introduite, calculée en fonction du rapport des dimensions d'un caractère.

Enfin, on peut souligner que la maille initiale est une puissance de deux de la maille finale, qui a été fixée dans cette application à cinq largeurs (ou trois hauteurs) de caractère typographique.

2. EXEMPLE INTRODUCTIF

L'objectif poursuivi dans cet article n'est pas de démontrer que les tracés obtenus sont équivalents à ceux réalisés à la main par des spécialistes: pour cela, il conviendrait de se reporter aux travaux des auteurs cités en bibliographie, et, en particulier, à l'article d'E. DAVAUD qui illustre abondamment l'adéquation de l'algorithme, quelle que soit la répartition des données initiales.

Compte tenu de la diversité des applications potentielles, il a été par contre jugé intéressant d'insister sur la souplesse d'emploi introduite par les paramètres disponibles.

2.1. Jeu d'essai

Il a été choisi comme exemple un ensemble de 300 observations, irrégulièrement réparties sur un domaine plan. La variable ainsi représentée peut y prendre toutes les valeurs comprises dans l'intervalle fermé (1, 4). La figure 3 présente le domaine considéré, la localisation des points observés et la position initiale de la grille minimale. En vraie grandeur, c'est-à-dire pour un tracé s'étendant sur la largeur de la page d'imprimante, la maille de cette grille couvre une superficie d'un pouce carré (10 colonnes,

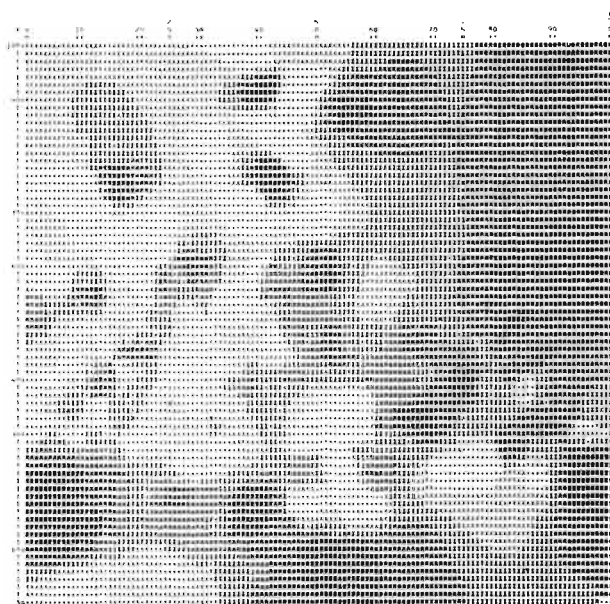


Fig. 4. — Surface obtenue sur une page d'imprimante.

6 lignes), et se déplace d'une position selon chacun des axes pour permettre l'interpolation en tous les nœuds du rectangle maillé, limité aux points extrêmes d'observation.

2.2. Résultat obtenu

La carte présentée sur la figure 4 montre la configuration que l'on obtient pour un ensemble de valeurs choisies des paramètres. La représentation sous la forme de zones de valeurs comprises dans un même intervalle est réalisée par l'emploi de symboles graphiques, dont le taux d'obscurcissement varie proportionnellement avec la valeur à figurer. Ce tracé a été établi avec cinq itérations, une pondération dans le rapport 100/1 pour les valeurs observées, six classes d'isovaleurs et toute la région à étudier sur une page d'imprimante.

2.3. Action sur les paramètres

La méthode, telle qu'elle a été conçue à l'origine, met à la disposition des utilisateurs de nombreux paramètres. En dépit de la souplesse d'utilisation que permettent les diverses combinaisons possibles, le foisonnement de listages résultants ne facilite en rien la mise au point du tracé définitif. Dans le double objectif de limiter le nombre d'essais infructueux d'une part, d'orienter les utilisateurs vers un ensemble de combinaisons usuelles plus plausibles d'autre part, certains de ces paramètres ont été fixés à des valeurs

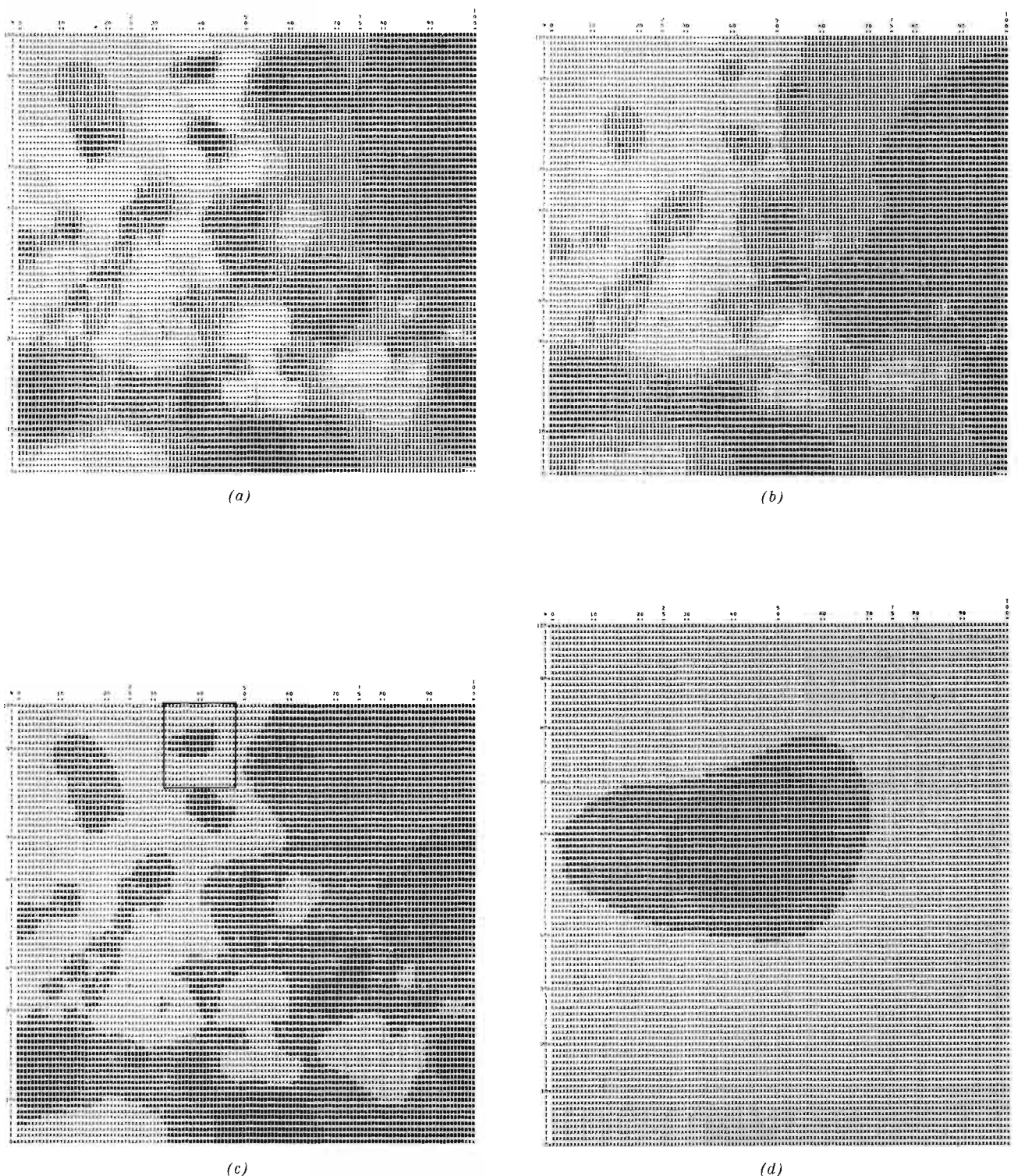


Fig. 5. — Exploitation des paramètres : (a) Poids = 100, classes = 6, échelle = 1. (b) Poids = 1, classes = 6, échelle = 1. (c) Poids = 100, classes = 3, échelle = 1. (d) Poids = 100, classes = 3, échelle = 6.

dont le choix a été dicté par l'expérience. Les paramètres à considérer restent néanmoins nombreux :

- les dimensions du graphique ont été choisies de telle sorte que celui-ci occupe toute la largeur disponible, tout en restant inscrit dans une double page. Cela conduit à fixer le nombre de colonnes à 128 et le nombre de lignes à 110, ce qui n'impose aucune restriction sur les valeurs réelles des coordonnées, étant entendu qu'il est possible de permuter les axes;

- le nombre d'itérations, compte tenu des dimensions choisies pour le tracé et de la remarque concernant la maille initiale (voir alinéa 1.4), doit être fixé de telle manière que l'on obtienne une couverture complète de la région sans calculs superflus. Généralement des résultats excellents sont obtenus avec quatre ou cinq itérations;

- la pondération à attribuer aux observations constitue un moyen de traduire sur le tracé les caractéristiques de « relief » de la surface. En effet, l'attribution d'un poids élevé aux valeurs observées, par rapport aux valeurs interpolées environnantes, contraint la surface obtenue à passer par tous les points de mesure, alors qu'un poids faible produit une surface plus éoussée. Les deux valeurs de poids choisies (1 et 100) sont illustrées sur les figures 5 a et b. Entre ces deux valeurs extrêmes, l'utilisateur peut faire varier l'intensité de cette pondération à son gré;

- le nombre de classes d'isovaleurs a été volontairement limité à six, de façon à obtenir une hiérarchie optimale dans le contraste entre zones. On notera que l'utilisation d'un nombre de classes inférieur (comparer les figures 5 a et c) schématise les tendances générales de la fonction à cartographier, ce qui peut constituer une esquisse souvent bien utile et parfois suffisante;

- les limites des classes d'isovaleurs doivent être fixées par l'utilisateur, à chaque travail. Bien entendu un choix judicieux de celles-ci est nécessaire pour obtenir un bon résultat : l'établissement d'un histogramme pourra alors quelquefois y aider;

- l'échelle de la représentation peut enfin être modifiée en séparant la région à étudier en plusieurs aires distinctes, ou encore pour préciser un détail (voir l'exemple de la figure 5 d, agrandissement de la zone encadrée en 5 c).

3. EXEMPLE D'APPLICATION

Le but poursuivi dans le présent chapitre est de présenter un exemple d'application de la méthode proposée à des données de sols. En particulier, on

s'intéresse principalement à la comparaison des représentations obtenues pour un ensemble de variables observées en divers points d'une même région géographique.

La réalisation pratique des différentes cartes à une même échelle impose de légères modifications de la version de base du programme, de même que la superposition automatique du contour de la région étudiée, qui constitue une aide précieuse pour l'exploitation visuelle des tracés.

L'interprétation des résultats obtenus s'appuie essentiellement sur l'examen des tendances de chaque caractère cartographié. L'attention du chercheur doit être attirée sur l'éventuelle hétérogénéité des points de mesure entre eux, due, par exemple, à des modes opératoires différents pour certaines données de laboratoire.

Néanmoins, l'expérience acquise à la faveur de cette étude particulière montre que la réalisation de cartes thématiques constitue un outil de synthèse intéressant et objectif, permettant d'argumenter les conclusions formulées dans les domaines les plus divers (détection d'erreurs, recherche des unités cartographiques, analyse de corrélation, aide à la classification...).

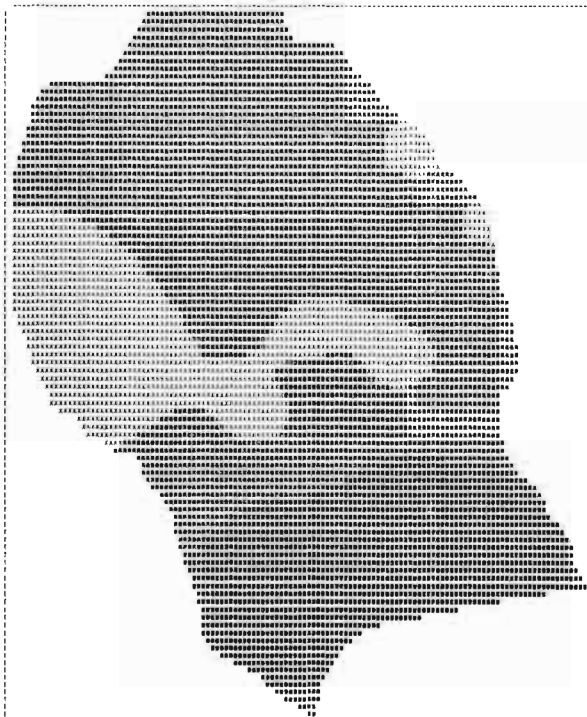
3.1. Les données

Le plateau de Gadzi, situé à l'ouest de la République Centrafricaine, a été retenu en raison de l'homogénéité de son matériau : sables de décomposition des grès de Carnot du Continental Intercalaire, recouvert au sud, selon les géologues, de placages sableux tertiaires (sables de Bambio).

Le couvert végétal est constitué au sud d'une forêt dense humide semi-caducifoliée, qui remonte près de Carnot le long d'une vallée (fig. 6 f). Une savane soudano-guinéenne à *Burkea-Lophira*, recouvre la moitié nord de cette région. On constate dans cette zone de savane un léger déficit de la pluviométrie (inférieure à 1400 mm), le climat étant tropical humide à deux saisons tranchées. La pluviométrie croît normalement vers le sud et la forêt équatoriale, mais aussi à l'extrémité nord, où l'escarpement de Bouar correspond au prolongement oriental du plateau camerounais de l'Adamaoua.

Le plateau de Gadzi, qui se présente sous l'aspect de larges interfluvés multiconvexes, apparaît basculé. Relevé au niveau 900-1000 mètres près de Bouar, il s'enfonce progressivement vers la cuvette congolaise. Sur la frontière du Congo (limite sud-est de l'étude), il se situe au niveau 600 mètres.

Une première étude pédologique d'ensemble a été consacrée à ces grès par P. BENOIT-JANIN en 1959; elle concerne 41 profils caractéristiques publiés. Par



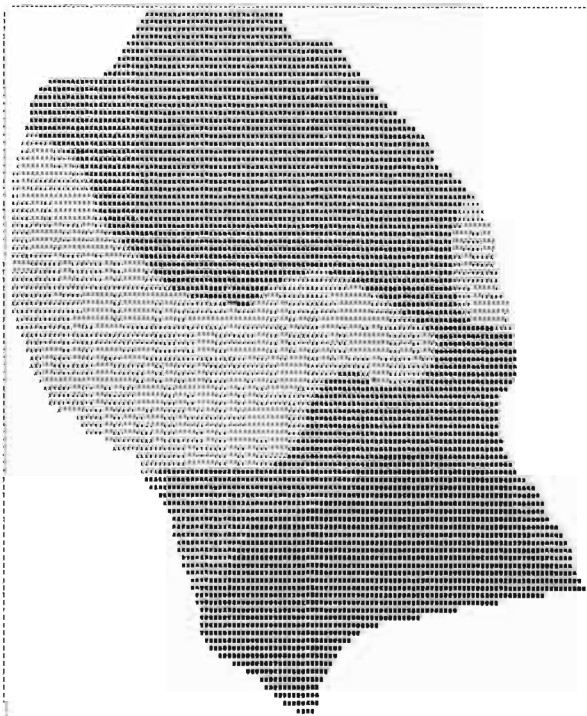
(a)



(b)

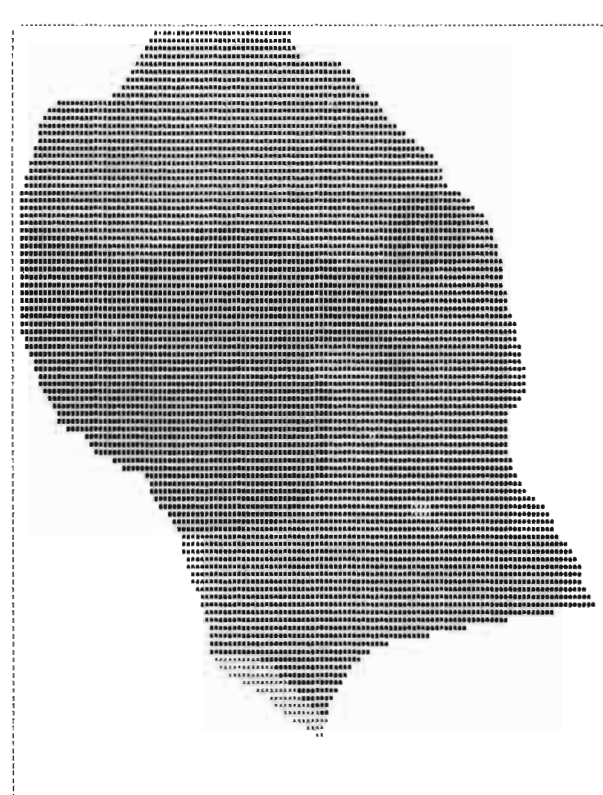


(c)

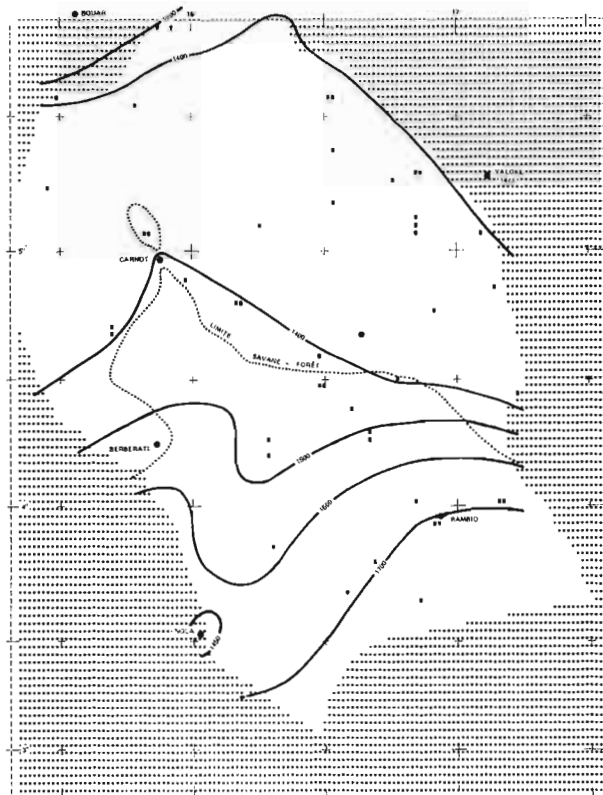


(d)

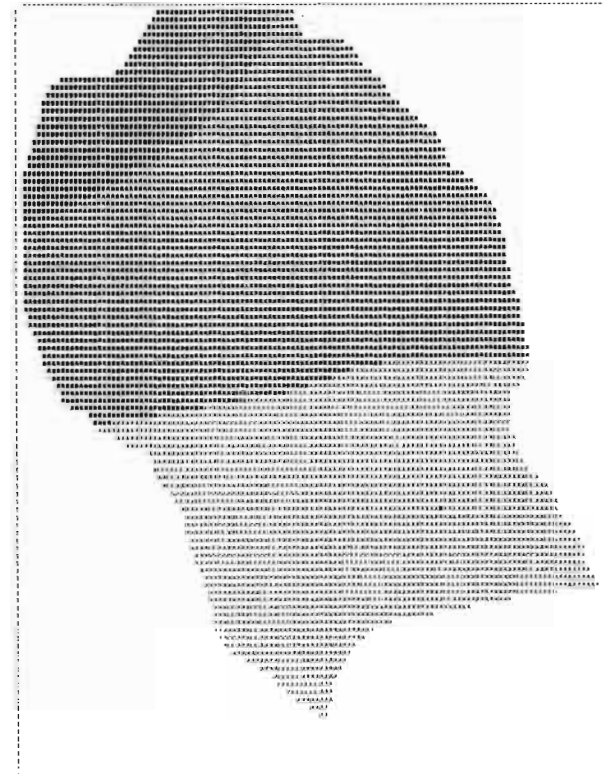
Fig. 6. — Traitement cartographique des profils sur Grès de Carnot : (a) Taux de sable grossier en A₁. (b) Taux de sable grossier en A₂. (c) Taux de sables grossier en B₁. (d) Taux moyen de sable grossier. (e) Moyenne des bases échangeables. (f) Plan de situation et isohyètes. (g) Moyenne de (pH eau - pH KCl). (h) Taux de saturation moyen.



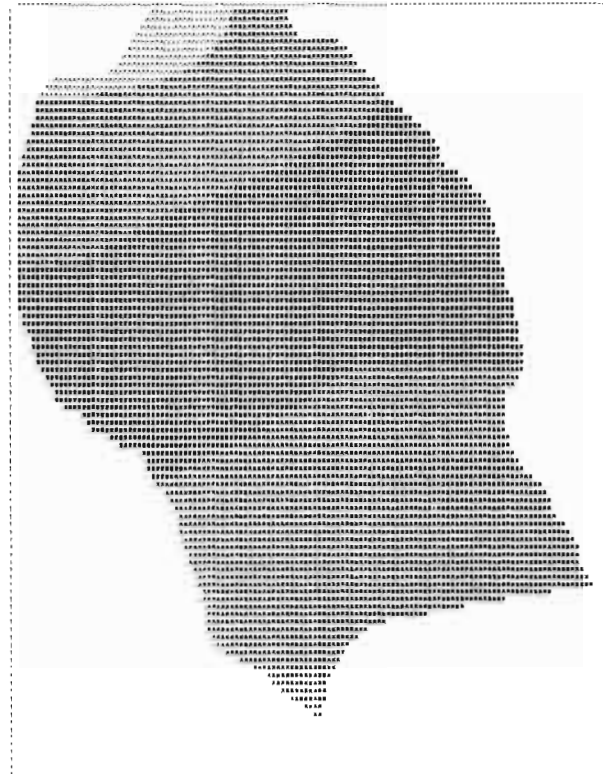
(e)



(f)



(g)



(h)

la suite, des études analytiques plus approfondies ont été effectuées par Y. CHATELIN (2 profils : séquence de Kourou) et Y. BOULVERT (13 profils : séquences de Tedom, Bambio et M'baere).

Pour chaque point d'observation on a retenu pour ce travail, en plus des données caractéristiques du profil (coordonnées géographiques, altitude et végétation environnante, en distinguant savane, forêt dense humide et forêt dégradée), un ensemble de résultats d'analyses des échantillons prélevés dans trois horizons A1 (0-10 cm), A3 (vers 25 cm) et B1 (vers 1 m) : pourcentage de sables totaux et de sable grossier, taux de matière organique, pH et différence entre le pH-eau et le pH-KCl, somme des bases échangeables, taux de saturation et rapport C/N.

3.2. Adaptation du programme

La version du programme destinée à permettre la cartographie de plusieurs paramètres sur une même région diffère quelque peu de la version de base utilisée dans l'exemple précédent, et dont la liste est fournie en annexe. Il est en effet indispensable d'adopter des valeurs standards pour les paramètres, de façon à comparer des tracés établis selon des critères uniformes.

Ainsi, pour chaque carte, les dimensions maximales de la grille d'interpolation sont fixées automatiquement par les points observés extrêmes (fig. 1). Donc, lorsque l'on utilise la méthode pour plusieurs paramètres, pas toujours observés aux mêmes points, il est nécessaire de figer les dimensions maximales du tracé pour conserver l'échelle.

L'introduction du contour de la région à étudier ne pose guère de problèmes, surtout lorsque, comme c'est le cas ici, ce contour est simple, c'est-à-dire lorsque chaque ligne horizontale ne coupe la frontière qu'en deux points au plus.

Dans la mesure où l'on s'intéresse beaucoup plus à une analyse de tendance générale pour chacun des paramètres, plutôt qu'à une cartographie détaillée (pour laquelle d'ailleurs, le nombre de points observés serait très probablement insuffisant), il a été choisi de réaliser les tracés avec une fonction de pondération de 1/1 et un nombre de classes d'isovaleurs limité à 3, afin de ne pas mettre en évidence des hétérogénéités locales, sans intérêt pour cette étude. Toutefois il peut être intéressant de réaliser quelques tracés avec le poids 100, de façon à déceler rapidement d'éventuelles incohérences dans les données.

Le choix des limites de classes est délicat, et doit être réservé au pédologue qui se laissera orienter par l'interprétation qu'il compte mener. Ainsi, si la préoccupation majeure de celui-ci est la classification des sols de cette région, il est tout naturel de choisir

les limites de séparation des groupes de sols. Dans cet exemple précis on a choisi d'effectuer une analyse en fréquences de chaque échantillon (en utilisant le logiciel BMDP), pour définir comme limites de classes les valeurs correspondantes aux tiers de la surface de l'histogramme.

Enfin, le programme a dû également être modifié pour permettre la cartographie des paramètres intégrés le long d'un profil, de manière à obtenir une valeur moyenne locale.

3.3. Exploitation des résultats

En première approximation, ces sols semblent très homogènes. Ce sont des sols ferrallitiques appauvris psammitiques, qui contrastent avec ceux du socle précambrien ancien environnant, par l'absence quasi générale de nodules ferrugineux et de cuirasses.

P. BENOIT-JANIN distingue deux grandes séries : la série de Gadzi, sous savane et la série de Bambio, sous forêt. A partir des résultats analytiques, on peut considérer les sols de la première série comme moyennement désaturés, les sols de la seconde série comme fortement désaturés, le taux moyen de sable grossier s'élevant par ailleurs de l'une à l'autre de 50 à 65 %.

Le traitement informatique montre que la réalité est plus complexe. Parmi les données traitées, seules certaines ont été retenues. A titre d'exemple, les teneurs en sable grossier ont été comparées dans les trois horizons A1, A3 et B1. Des effectifs semblables se regroupent en trois classes de valeurs maximales respectives : 47, 60 et 87 % pour A1 ; 46, 60 et 81 % pour A3 ; 41, 55 et 80 % pour B1 soit en moyenne 45, 58 et 83 %. La comparaison des figures correspondantes (voir fig. 6 a, b, c et d) met en évidence la similitude de différenciation des profils à l'intérieur de la zone d'étude. Elle confirme certes que les taux de sable grossier sont très élevés sous vieille forêt au sud (teinte sombre), mais il apparaît de plus que ces taux sont plus faibles dans les zones de défrichement récent, en lisière forestière et sur les bordures des grès (teinte claire).

Ce type de représentation se confirme sur la figure 6 e, où est cartographiée la valeur moyenne, dans le profil, de la somme S des bases échangeables. Ainsi, les sols de cette région, en général moyennement désaturés ($S < 2$ meq), n'apparaîtraient fortement désaturés ($S < 1$ meq) que très localement autour de Bambio et au sud de Nola. Par contre, dans la zone centre-ouest des grès, ils seraient faiblement désaturés : la somme des bases échangeables est plus élevée dans les sols qui contiennent le moins de sable grossier (donc plus d'éléments fins). En dépit d'un nombre de points de mesure restreint, on peut tirer des conclusions intéressantes des tracés

représentés sur les deux dernières figures (voir fig. 6 g et h). On relève un net gradient d'accroissement du sud vers le nord pour la différence des pH-eau et pH-KCl. Sous forêt dense les sols sont acides; à proximité du point isoélectrique les valeurs observées pour ce paramètre sont plus faibles. Quant à l'extrémité nord, l'accroissement de la différence des pH est à relier à la baisse du taux de saturation près de l'escarpement.

Sur le graphique des moyennes de $V = S/T$, il semblerait que le taux de saturation, par rapport à une zone centrale faiblement désaturée, diminue normalement vers le sud, en forêt dense, mais aussi vers le nord et l'escarpement de Bouar.

Ces derniers résultats s'accordent assez bien avec la carte des isohyètes annuelles. Ils montrent que la désaturation ne correspond pas à des critères schématiques simples du type savane tropicale ou forêt dense équatoriale. La réalité, plus complexe, montre la difficulté de faire intervenir ce critère à un niveau élevé en cartographie pédologique.

4. UTILISATION

Cette dernière partie traite plus particulièrement des différentes façons d'utiliser ce système. Schématiquement il y a deux façons de procéder, selon les moyens de calcul dont dispose le chercheur sur son site de travail.

Dans le premier cas, le traitement correspondant est en tout (ou partie) exécuté à Bondy, ce qui implique certaines sujétions dans la démarche, dues à l'éloignement. Au contraire, si on peut implanter le programme sur place, des résultats plus rapides pourront être obtenus grâce à l'interprétation menée en temps réel.

4.1. Version BDP

La version mise au point aux Services Scientifiques Centraux utilise un programme codé en Fortran IV (niveau II), pour être exécutée sur un ordinateur IBM-370/168 (ou apparenté), sous système opérationnel OS-MVS. Dans ces conditions d'exploitation, le programme a été optimisé de telle sorte que le prix de revient de chaque tracé soit le plus faible possible. A titre d'exemple, on peut signaler qu'un tracé sur double-page, tel que celui présenté sur la figure 4, coûtait moins de 20 F en décembre 1980.

4.2. Mode d'emploi

En pratique, pour utiliser la méthode, il convient de disposer d'une — ou plusieurs — variable à cartographier, sur une région déterminée, variable

connue en un certain nombre de points de mesure repérés par des coordonnées rectangulaires. En principe, l'hypothèse de continuité peut être contournée si l'on ne s'intéresse qu'à une tendance générale à partir de points d'observation caractéristiques.

Les seules données nécessaires à l'exécution sont les coordonnées de ces points, associées aux valeurs observées. Celles-ci peuvent être fournies sous forme manuscrite (ou dactylographiée), ou sur support directement utilisable par l'ordinateur. Dans un premier temps une analyse statistique de l'échantillon, comprenant en particulier le tracé automatique de l'histogramme, sera systématiquement réalisée afin d'orienter le choix des limites de classes, bien entendu seulement si celles-ci n'ont pas été initialement fournies par le demandeur.

Il est bien évidemment souhaitable que les données soient présentées sous la forme directement acceptable par le programme : pour chaque point, on fournira les deux coordonnées x et y , puis la valeur du (des) paramètre(s) à cartographier. Exemple : x , y , paramètre 1 (paramètre 2...). La largeur de chaque champ de codification est laissée au choix de l'utilisateur. L'exécution du programme peut être réalisée dès que ce fichier se trouve sur un support admissible par l'ordinateur.

4.3. Transportabilité

Le programme, dont la liste est donnée en annexe, a été soigneusement dépouillé de toute instruction spécifique d'un compilateur donné. La taille mémoire nécessaire à l'exécution de la version présentée est de 260 K octets. Néanmoins elle peut être facilement réduite (à 150 K environ), sans modification d'échelle, grâce à l'utilisation de supports externes comme mémoires de travail. Suivant les critères adoptés pour la facturation dans les différents centres de calcul (coût des entrées-sorties, des montages de volumes, de l'occupation en mémoire centrale, du temps de CPU...), toute solution intermédiaire entre ces deux extrêmes peut être envisagée.

A noter que le programme doit être légèrement modifié lorsque l'on prévoit l'utilisation d'imprimantes qui ne permettent pas la surimpression (imprimante électrostatique, par exemple).

Conclusion

La seule utilisation d'imprimantes alphanumériques, en tant que périphériques de sortie pour le tracé de cartes, astreint à quelques limitations. En particulier, la différenciation des zones repose sur les contrastes entre caractères, ce qui limite le nombre de classes d'isovaleurs utilisables; la résolution est fixée par les dimensions d'un caractère typogra-

phique, ce qui diminue la précision du tracé et interdit pratiquement la représentation par contours.

Ces derniers inconvénients peuvent être éliminés par l'utilisation de périphériques graphiques (ensembles écran+imprimante de type « hard-copy » ou encore traceurs de courbes) à haute résolution. Dans ces conditions, la méthode doit être modifiée (une fois la grille finale obtenue) pour le tracé des contours d'isovaleurs, par interpolation entre les

points de la grille de basse résolution (BATCHA et REESE, 1964).

Toutefois, la méthode avec sortie graphique n'offre pas aisément la possibilité d'ombrer graduellement les surfaces comme le procédé proposé. En outre, l'avantage essentiel de ce dernier réside dans sa portabilité, liée à l'universalité de l'imprimante conventionnelle. L'utilisation de ce matériel standard, qui reste de loin le plus répandu, s'accompagne de surcroît d'un faible coût de réalisation des tracés.

BIBLIOGRAPHIE

- BATCHA (J. P.) and REESE (J. R.), 1964. — Surface determination and automatic contouring for mineral exploration, extraction and processing. *Colorado School Mines Quart.*, 59(4) : 1-14.
- BENOIT-JANIN (P.) et KOECHLIN (P.), 1959. — Étude Pédobotanique de la région des grès de Carnot. O.R.S.T.O.M.-Bangui, *mulligr.*, 71 p.+tab.
- BENOIT-JANIN (P.), 1960. — Les sols formés sur les grès de Carnot. III. Conférence Interafricaine des sols, (2) : 459-462.
- CHATELIN (Y.), BOULVERT (Y.) et BEAUDOU (A. G.), 1972. — Typologie sommaire des principaux sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étudiés en République Centrafricaine. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. X, (1) : 59-75.
- DAVAUD (E.), 1975. — Le traçage automatique des cartes d'isovaleurs : un algorithme simple en Fortran IV. *Can. J. Earth Sci.*, 12 : 1069-1077.
- DAVIS (J. C.) and McCULLAGH (M. J.), 1974. — Display and analysis of spatial data. Wiley. New York.
- OJAKANGAS (D. R.) and BASHAM (W. L.), 1964. — Simplified computer contouring of exploration data. *Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.* 9 (2) : 757-770.
- PELTO (C. R.), ELKINS (T. A.) and BOYD (H. A.), 1968. — Automatic contouring of irregularly spaced data. *Geophysics* 33, (3) : 424-430.
- PEUCKER (T. K.), 1972. — Computer cartography. Assoc. American Geographers, Commission on college geography, *Resource Paper* 17, 75 p.

Aspects minéralogiques et pédogénétiques de deux sols dérivés de péridotites dans l'ouest de Cuba

Pierre SÉGALEN (1), Dalmacio BOSCH (2), Abilio CARDENAS (2), Eloy CAMACHO (2), Annie BOULEAU (1),
Huguette GUÉNIN (1), Dominique RAMBAUD (1)

(1) Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France

(2) Institut des Sols de l'Académie des Sciences de Cuba. Apartado 8022, Capdevila, Habana, Cuba

RÉSUMÉ

Deux sols dérivés de péridotite ont été examinés dans la partie occidentale de Cuba. L'un d'eux, MAD, est chargé en quartz, et renferme dans ses parties rouges de l'hématite et de la goethite, dans ses parties brunes uniquement de la goethite. L'autre, CAJ, de couleur rouge, contient surtout de la goethite et un peu d'hématite et pas de quartz. Il présente à la base du profil de l'antigorite en abondance. Les teneurs en oxydes de fer, ramenées à la fraction fine sont de l'ordre de 60 %, un seul pedon contient de la gibbsite ce qui abaisse notablement le rapport silice-alumine. Il existe des minéraux argileux 1/1 en quantité modérée et un peu de minéraux argileux 2/1.

Ces deux sols posent des problèmes analytiques : la détermination des oxydes de fer libres ne peut se faire par les méthodes traditionnelles ; la gibbsite ne peut être identifiée qu'après élimination de très fortes quantités d'oxydes de fer.

La genèse de ces sols s'effectue par hydrolyse complète des minéraux constitutifs dominants des péridotites. Mais deux voies peuvent être retenues. Dans l'une, la silice précipite en abondance, sous forme de quartz. Dans l'autre, la silice et le magnésium sont d'abord retenus sous forme d'antigorite qui disparaît à son tour.

SUMMARY

Two peridotite derived soils are examined in western Cuba. One of them (MAD) is quartz rich and presents two colors ; the red parts of the profile contain hematite and goethite, the brown ones only goethite. The other (CAJ) is red but contains amounts of goethite and no quartz, but near the parent rock is rich in antigorite. The amount of iron oxides, after deduction of the sands, is around 60% ; one of the soils contains moderate amounts of gibbsite which lowers the silica/alumina ratio. Clay minerals, in moderate amount, can also be identified.

Both soils set analytical problems : the determination of free iron oxides cannot be done by usual methods. Gibbsite cannot be identified without removal of most of the iron oxides.

Soil genesis is accomplished through complete hydrolysis of the dominant minerals. But two different paths are possible. In the first, silica precipitates abundantly, as quartz. In the second, some silica and magnesium are retained as antigorite before they both disappear completely.

RESUMEN

Fueron estudiados dos suelos derivados de peridotitas en la parte occidental de Cuba. Uno de los dos, MAD, contiene abundante cuarzo, y encierra en las partes rojas, la hemalita y la goethita. El otro, CAJ, es rico en goethita, no contiene cuarzo, pero en la base del perfil es abundante la antigorita. El contenido en óxidos de hierro, en base a la fracción fina es del orden de 60 %, solo un edafón contiene gibbsita, lo cual reduce notablemente la relación sílice/aluminio. Existen en cantidades moderadas minerales arcillosos 1/1 y un poco de minerales arcillosos 2/1.

En ambos casos se presentan problemas analíticos : la determinación de óxidos de hierro libre no puede realizarse por los métodos tradicionales ; la gibbsita no puede ser identificada, hasta tanto no sean eliminadas grandes cantidades de óxidos de hierro.

La genesis de estos suelos se produce por un hidrolisis completa de los minerales dominantes que constituyen las peridotitas. Pueden considerarse dos vías : una donde la sílice precipita en abundancia en forma de cuarzo ; la otra, la sílice y el magnesio son retenidos primeramente en forma de antigorita, la cual desaparece posteriormente.

Introduction

Au cours d'une tournée effectuée en 1979 avec G. AUBERT dans l'ouest de Cuba, deux sols dérivés de péridotite ont été examinés. Le premier, dénommé MAD, a été observé près de Madruga, à environ 35 km au Sud-Est de La Havane, à 100 m d'altitude. Le deuxième, dénommé CAJ, a été observé près de l'école forestière de Cajalbana, à environ 90 km à l'Ouest de La Havane, à 700 m d'altitude. Ces deux sols appartiennent au groupement des *sols ferritiques* (1) de la classification génétique des sols de Cuba (1979). Dans la classification française CPCS (1967), ils appartiennent, par leur genèse, aux *sols ferrallitiques*, mais à une place encore à préciser. Dans la Soil Taxonomy (1975), ce sont des *acrorthox* et dans la légende des sols F.A.O.-U.N.E.S.C.O., des *ferralsols acriques*.

Ces sols ferritiques ont attiré l'attention depuis fort longtemps. BENNETT et ALLISON (1928) les ont décrits sous le nom de *série de NIPE*. Ils ont fait déjà l'objet de diverses études par CARDENAS *et al.* 1978, SAAVEDRA *et al.* 1976.

Un certain nombre de déterminations et de mesures ont été effectuées sur les échantillons prélevés sur ces profils, afin de préciser la nature des constituants minéraux de ces sols.

1. MATÉRIEL ÉTUDIÉ. MÉTHODES ANALYTIQUES ET D'EXAMEN

Quelques données succinctes sont fournies sur les deux profils :

MAD dérivée d'une roche fortement serpentinisée (cf. photo 1)

0-20 cm Brun foncé ; argilo-sableux, structure polyédrique émoussée moyenne. La transition brutale avec la partie inférieure du profil fait penser que cet horizon est remanié.

20-100 cm Rouge (10 R 3/4) avec des poches brunes (2,5 YR 3/6) ; argilo-sableux avec de nombreux petits grains de quartz ; structure polyédrique émoussée très fine.

100 et + Rouge (10 R 3/4) avec de nombreuses lames de quartz verticales.

Deux prélèvements ont été effectués : MAD 1 dans la partie rouge, MAD 2 dans une poche brune afin de déterminer en quoi diffèrent ces deux parties du profil.

CAJ dérivé d'une roche péridotite à olivine et hypersthène (cf. photo 2)

0-10 cm Rouge foncé (10 R 3/3) ; argileux ; structure nuciforme très fine ; très friable ; nombreuses racines.

10-80 cm Rouge foncé (10 R 3/2) ; argileux ; structure nuciforme très fine : avec une surstructure en assez gros blocs prismatiques ; très friable.

80-90 cm Roche recouverte d'un enduit lamellaire blanc.

Quatre échantillons ont été prélevés : CAJ 1 à 0-10 cm, CAJ 2 à 50 cm, CAJ 3 à 75 cm ; CAJ 4 correspond aux lames blanches.

Les deux profils sont donc peu épais ; la structure est polyédrique émoussée moyenne en surface à polyédrique fine à très fine en profondeur ; la couleur est rouge foncé, régulière à Cajalbana ; avec des taches brunes à Madruga.

La texture est très différente, puisqu'à Madruga, le quartz est très abondant, et absent à Cajalbana. Les lames blanches sont particulièrement nettes à Cajalbana, absentes à Madruga.

(1) Cf. ZONN *et al.* 1966.

TABLEAU A

Analyse triacide des échantillons : (a) échantillon brut ; (b) après enlèvement du résidu ; PF : perte au feu ; Fe_2O_3 L : 3 extractions dithionite de sodium ; T : attaque acide chlorhydrique concentré bouillant.

		SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	TiO_2 %	MnO_2 %	PF %	Résidu %	CaO %	MgO %	K_2O %	Na_2O %	Total %	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$	Fe_2O_3 Libre %	Fe_2O_3 Total %	Fe_2O_3 L/T
MAD	1....	7,60	6,40	28,3	0,19	0,07	5,70	50,4	0,36	0,30	0,07	0,29	99,68	2,01	0,52	16,1	27,75	58,0
(a)	2....	5,00	3,25	27,8	0,07	0,08	5,45	57,3	0,24	0,46	0,05	0,33	100,03	2,61	0,40	15,0	26,0	57,7
MAD	1....	15,32	12,90	57,11	0,38	0,14	11,49		0,72	0,60	0,14	0,58	99,38			32,4	55,9	
(b)	2....	11,71	7,61	65,10	0,16	0,18	12,82		0,56	1,07	0,12	0,77	100,11			35,1	60,9	
CAJ	1....	7,40	14,9	56,3	0,45	0,81	10,2	6,35	0,61	1,47	0,10	0,27	98,86	0,84	0,25	18,5	50,25	36,8
(a)	2....	8,10	15,0	58,8	0,41	0,64	10,5	3,80	0,29	1,38	0,08	0,30	99,30	0,91	0,26	25,9	54,75	47,3
	3....	8,00	13,3	59,4	0,34	0,44	10,5	5,35	0,31	1,46	0,07	0,24	99,41	1,02	0,26	24,9	55,0	45,3
	4....	25,50	1,75	10,5	0,02	0,16	5,65	26,30	0,60	28,75	0,04	0,27	99,54	24,71	5,08	4,9	10,25	47,8
CAJ	1....	7,90	15,91	60,12	0,48	0,86	10,9		0,65	1,57	0,11	0,28	98,75			19,8	53,65	
(b)	2....	8,42	15,59	61,12	0,43	0,66	10,9		0,30	1,43	0,08	0,32	99,26			27,8	58,7	
	3....	8,48	14,09	62,95	0,36	0,46	11,1		0,33	1,54	0,07	0,25	99,63			26,3	58,1	
	4....	34,6	2,4	14,25	0,03	0,22	7,66		0,81	39,0	0,05	0,37	99,39			6,6	13,9	

Sur les échantillons prélevés, on a effectué l'analyse chimique par attaque triacide et la détermination du fer libre et du fer total par les techniques en au laboratoire des sols des S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M.

On a également effectué sur le sol total, et sur la fraction $<2\ \mu$, la diffraction des rayons X, avant et après déferrification. La fraction argile a été examinée au microscope électronique à transmission (JEOL JEM 100 μ).

2. RÉSULTATS OBTENUS

ANALYSE CHIMIQUE AU RÉACTIF TRIACIDE (TABL. A)

Un certain nombre de caractéristiques apparaissent :

(a) de fortes teneurs en oxydes de fer ; celles de CAJ 1, 2 et 3 sont, en gros, le double de MAD 1 et 2 ;

(b) de faibles teneurs en silice, alumine et bases ;

(c) de très fortes teneurs en silice et magnésium dans le seul échantillon CAJ 4 ;

(d) de fortes teneurs en résidu d'attaque pour les échantillons MAD. Si on calcule les pourcentages d'oxydes par rapport à la fraction attaquée par le réactif, on constate que, dans les deux sols, les teneurs en oxyde de fer sont très voisines de 60 % ;

(e) les rapports Silice/Alumine. Pour l'échantillon MAD 1, on obtient 2,0, ce qui indique de la kaolinite et pas d'hydroxyde d'aluminium ; pour l'échantillon

MAD 2, on obtient 2,6, ce qui implique la présence de minéraux argileux 2/1.

Par contre, les échantillons CAJ 1, 2 et 3 ont un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,0 à 0,8 ce qui implique la présence simultanée de kaolinite et d'hydroxyde d'aluminium.

EXTRACTION DES OXYDES DE FER LIBRES ET TOTAUX (tabl. A)

L'extraction des oxydes totaux donne des valeurs inférieures à celles obtenues par le réactif triacide, mais sensiblement du même ordre de grandeur.

L'extraction des oxydes libres a été conduite de deux manières :

(a) suivant la technique habituelle comportant trois extractions au dithionite de sodium ;

(b) en portant le nombre d'extractions à huit.

Le traitement habituel donne des valeurs représentant le tiers des oxydes totaux ; le traitement à huit extractions permet d'avoir les deux tiers des oxydes totaux et la courbe ne donne pas de signe d'un infléchissement significatif (fig. 1). Par conséquent, cette technique ne fournit pas de renseignements significatifs ; cela avait déjà été indiqué pour les échantillons à haute teneur en oxydes de fer (SÉGALEN, 1971). Dans le cas des sols étudiés, il est suggéré de s'en tenir aux extractions à l'acide concentré.

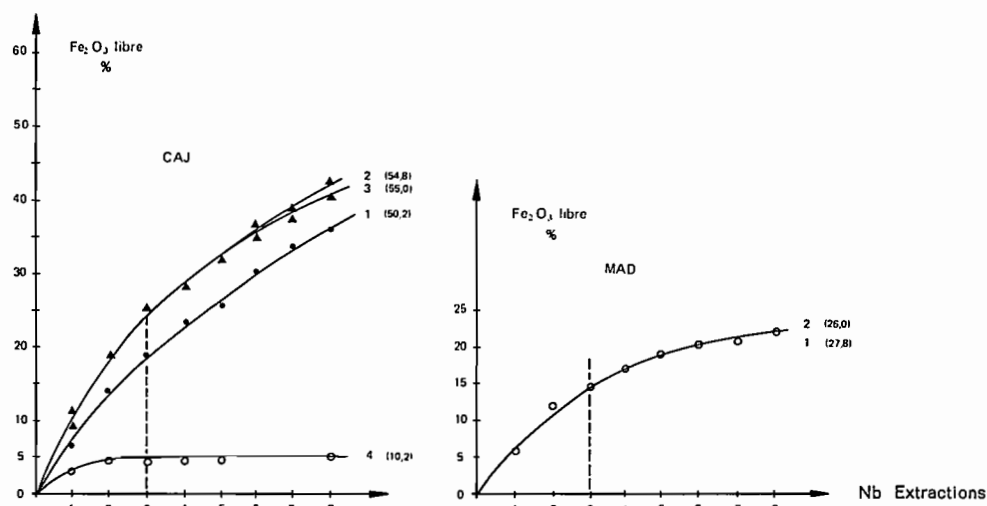


Fig. 1. — Dissolution des oxydes de fer libres par la dithionite de sodium. Les chiffres donnés pour chaque échantillon sont ceux des oxydes de fer totaux.

DIFFRACTION DES RAYONS X (FIG. 2 à 5)

Échantillons MAD 1. Sol entier.

L'examen des diagrammes X permet d'identifier immédiatement la goethite, l'hématite et le quartz abondants, ainsi que des quantités plus faibles de magnétite identifiée par ailleurs par ses propriétés magnétiques.

La présence d'un minéral argileux 1/1 est décelable par une bosse à 7,3 Å; on ne discerne rien entre 10 et 20 Å.

Échantillon MAD 2. Sol entier.

L'examen du diagramme permet d'identifier quartz et goethite.

La bosse à 7,3 Å est à peine marquée; un épaulement modéré, mais net, vers 12 Å indique la présence très probable d'un minéral argileux 2/1.

Échantillon MAD 1 et 2. Fraction inférieure à 2 µ.

L'examen des diagrammes sur la fraction argile de ces sols (poudre) apporte des précisions supplémentaires.

— Il y a toujours du quartz dans cette fraction, bien que les pics soient très faibles.

— La goethite est très abondante dans les deux échantillons; mais, dans MAD 1 le pic de l'hématite est très fort. La magnétite n'est pas identifiable.

— Aucun pic attribuable à la gibbsite n'est visible.

— Dans les deux cas, le pic à 7,3 Å est très net,

mais peu aigu; il lui correspond un pic à 4,4 Å. L'épaulement entre 10 et 14 Å est net dans les deux échantillons.

Les traitements (chauffage, glycérolage) des deux échantillons permettent d'identifier pour MAD 1 un peu de chlorite et pour MAD 2 un interstratifié illite-montmorillonite.

Échantillons CAJ 1, 2 et 3. Sol entier.

Les diagrammes sur le sol entier permettent d'identifier immédiatement la goethite dominante, l'hématite et un peu de magnétite. On peut reconnaître également, mais à l'état de traces, du pyroxène (hypersthène) et un minéral argileux 2/1 (faible épaulement vers 14 Å). Il n'y a pas de minéral argileux 1/1 visible.

Échantillon CAJ 4. Sol entier.

Cet échantillon renferme une très forte quantité d'antigorite, du pyroxène, de l'olivine et des traces de minéraux argileux 2/1. Les diagrammes établis sur la fraction argile (poudre) confirment, pour CAJ 1, 2 et 3, la prédominance de la goethite sur l'hématite. La présence faible d'un minéral argileux à 7 Å est difficile à assurer. Les minéraux argileux 2/1 ne sont visibles que dans le CAJ 1. Les minéraux primaires ont disparu. Dans l'échantillon CAJ 4, l'antigorite domine à côté d'un peu d'hématite et de goethite.

Les traitements (orientation, glycérolage, chauffage) de ces quatre argiles ne permettent pas d'identifier de minéraux argileux 2/1.

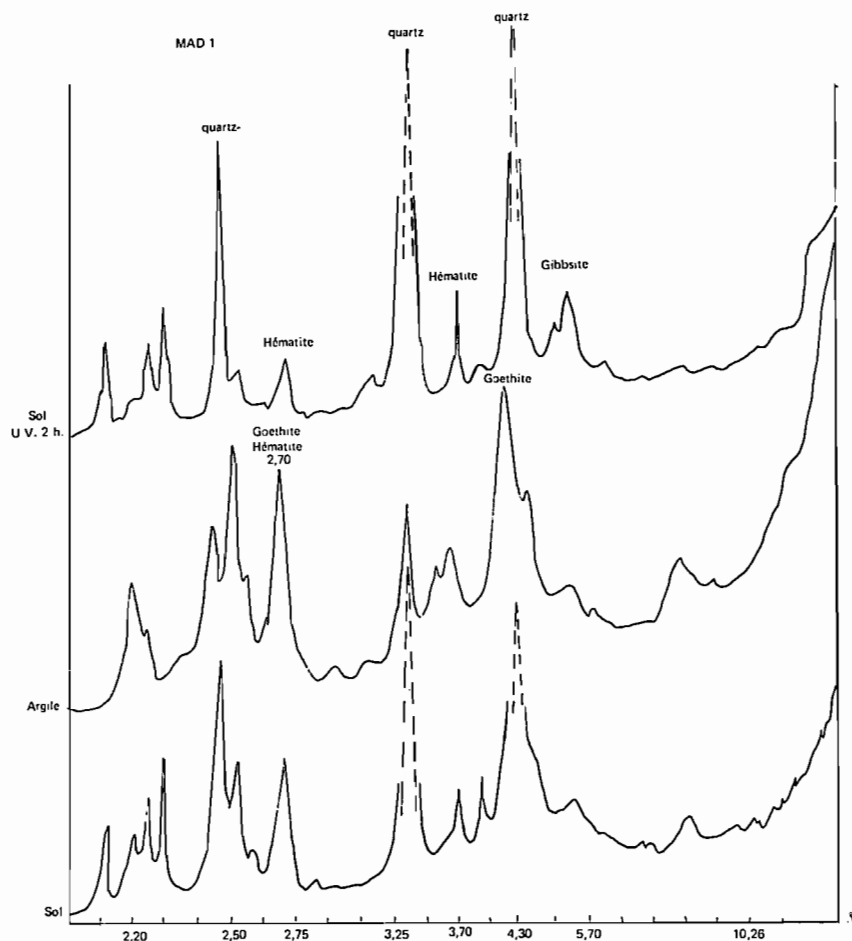


Fig. 2. — Diffraction des rayons X sur l'échantillon MAD 1 (sol, argile et sol traité suivant méthode d'Endredy).

L'examen des diagrammes X des sols ou des argiles sur cette série d'échantillons ne permet pas de voir de pic (à 4,8-4,9 Å ou 6,2 Å) susceptible d'indiquer la présence d'un hydroxyde d'aluminium. Des traitements particuliers ont été effectués pour déferrier les échantillons, à l'aide de la technique de De Endredy (1963) avec une solution d'acide oxalique et d'oxalate d'ammonium irradiée trois heures par une lampe à ultraviolets. Les échantillons ainsi traités ont été de nouveau soumis à l'action des rayons X. On a alors constaté :

— Échantillons MAD : Des pics peu importants, mais nets à 4,83 et 3,11 Å apparaissent indiquant l'existence de petites quantités de gibbsite.

— Échantillons CAJ : Des pics très développés à 4,86 et 3,13 Å correspondant à la gibbsite apparaissent sur CAJ 2. Les pics des minéraux argileux 1/1 ne sont guère différents; les épaulements des minéraux argileux 2/1 sont mieux visibles.

MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE DE TRANSMISSION (photos 3 à 6).

Un certain nombre d'échantillons ont été préparés et examinés par microscopie électronique, à des grossissements allant jusqu'à 30.000. D'une manière générale, les quantités d'oxydes de fer sont telles qu'elles gênent la transmission du faisceau et que la qualité des images s'en ressent. On peut toutefois procéder à une déferrification partielle qui améliore notablement la qualité des clichés.

MAD. On peut reconnaître de très beaux bâtonnets ou fuseaux de goethite et des petites plaquettes hexagonales de kaolinite. Il est possible de reconnaître quelques masses nuageuses de smectites. La gibbsite n'est pas identifiable.

CAJ. Sur les clichés des échantillons 1, 2 et 3 déferriés, il est possible d'identifier à côté de la goethite, de la kaolinite en petites plaquettes, de

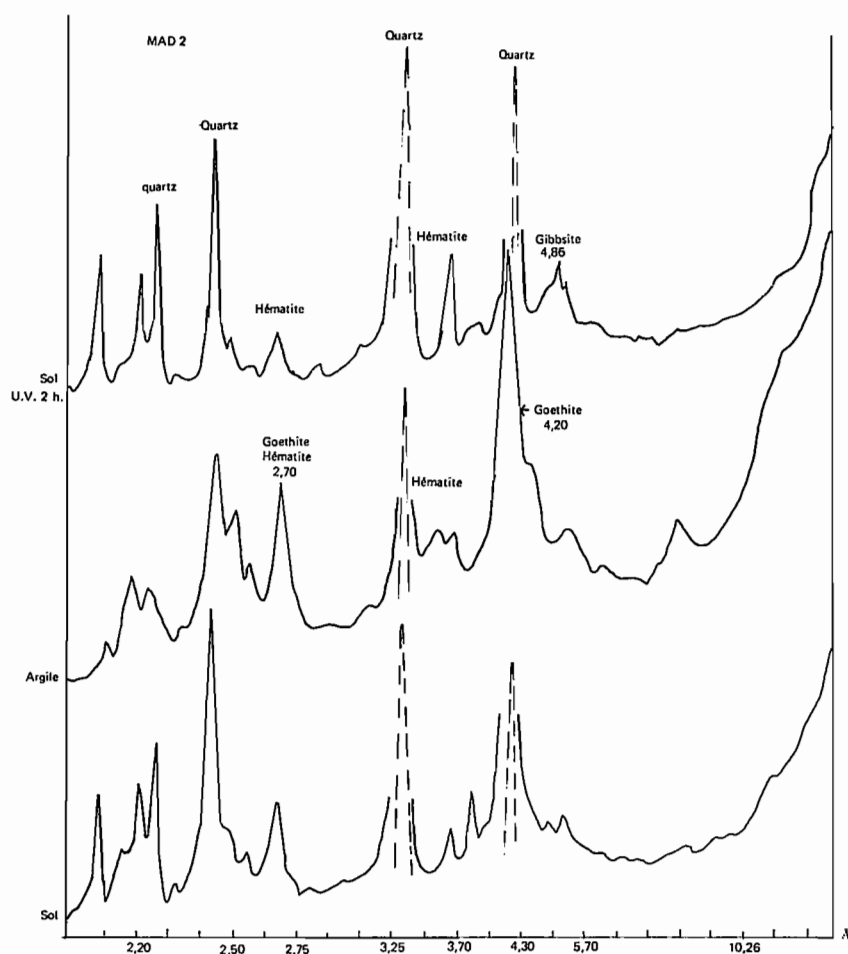


Fig. 3. — Diffraction des rayons X sur l'échantillon MAD 2 (sol, argile et sol traité suivant méthode d'Endredy).

TABEAU B

Estimation des constituants dans les échantillons étudiés : MAD 1 et 2 : La présence simultanée de smectites et kaolinites ne permet pas une estimation quantitative. CAJ 1, 2 et 3 : L'attribution de toute la silice à la kaolinite permet d'estimer la gibbsite avec l'alumine restante ; la répartition de l'eau restante permet d'estimer la goethite et l'hématite. CAJ 4 : Le calcul est approximatif. Il est probable qu'il y a un léger excès de silice et de magnésium dû à une attaque des minéraux primaires.

	Résidu	Kaolinite	Smectite	Antigorite	Gibbsite	Goethite	Hématite	Reste	Total
MAD	1...	50,4	• •	°	•	•	• •	1,3	
	2...	57,3	•	°	°	• •	•	1,2	
CAJ	1...	6,35	15,8	°	°	13,0	36	23,9	98,7
	2...	3,8	17,4	°	°	12,4	39	23,7	99,4
	3...	5,35	17,2	°	°	9,9	47	17,1	99,45
	4...	26,3	4,4	°	54	°	6	5,0	97,8

• • abondant
 • peu abondant
 ° nul.

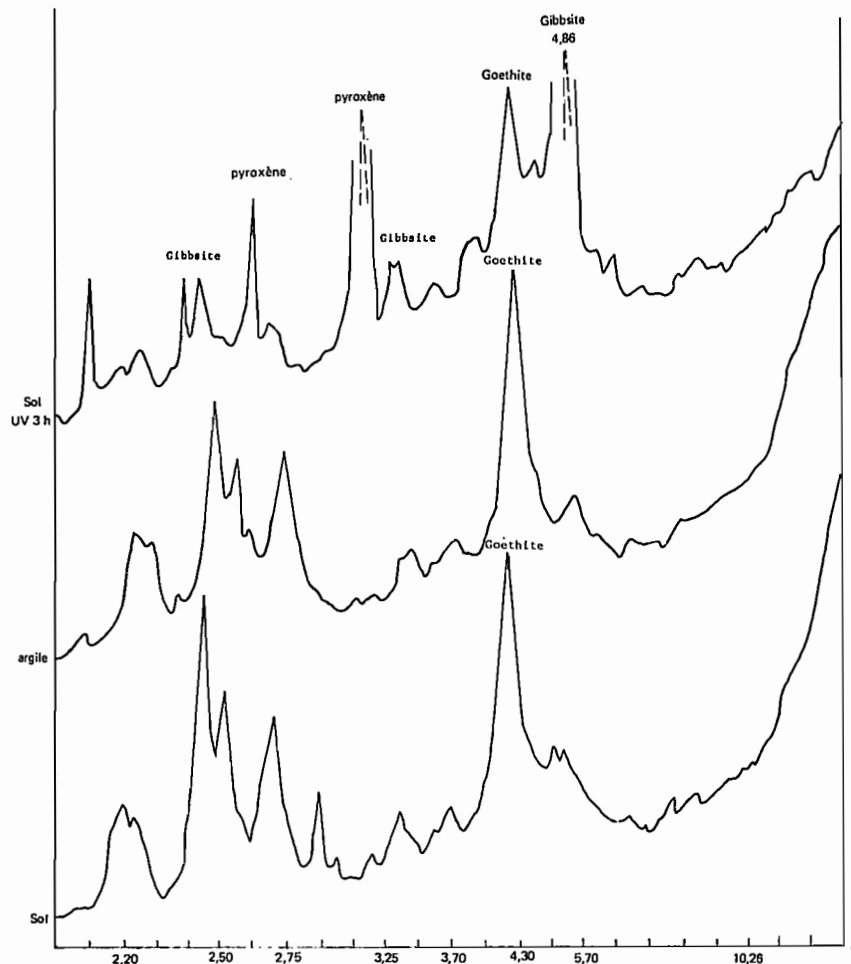


Fig. 4. — Diffraction des rayons X sur l'échantillon CAJ 3 (sol, argile et sol traité suivant méthode d'Endredy).

l'halloysite tubulaire; on ne voit ni smectite ni gibbsite. Sur les clichés de l'échantillon 4, on observe des bâtonnets rectangulaires de grande taille d'antigorite, dont l'identification est confirmée par micro-diffraction d'électrons; on observe également quelques petites plaquettes de kaolinite et de très beaux cristaux de goethite.

Estimation des constituants. A partir des teneurs en oxydes, des diagrammes X et de la microscopie électronique, on a tenté d'estimer les teneurs en constituants des sols. Cette estimation est pratiquement impossible pour les échantillons MAD où coexistent kaolinites et smectites. Par contre, pour l'échantillon CAJ, on peut estimer les teneurs en kaolinite, antigorite, gibbsite, goethite et hématite. Les résultats sont portés sur le tableau B.

3. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Un certain nombre d'enseignements peuvent être tirés de cet ensemble de résultats :

1^o *Couleur des échantillons.* On ne peut décider au vu des échantillons, du minéral ferrugineux dominant. Certes, dans les échantillons MAD, le brun est plus riche en goethite, et le rouge est plus riche en hématite. Mais tous les échantillons CAJ, pourtant rouges, sont beaucoup plus riches en goethite qu'en hématite. Le pouvoir colorant de cette dernière est donc beaucoup plus fort que celui de la goethite.

2^o *Teneurs en oxydes de fer.* Les teneurs en oxydes de fer total déterminées par l'attaque triacide sont plus fortes que celles obtenues par l'acide chlorhydrique bouillant. On peut penser que la différence

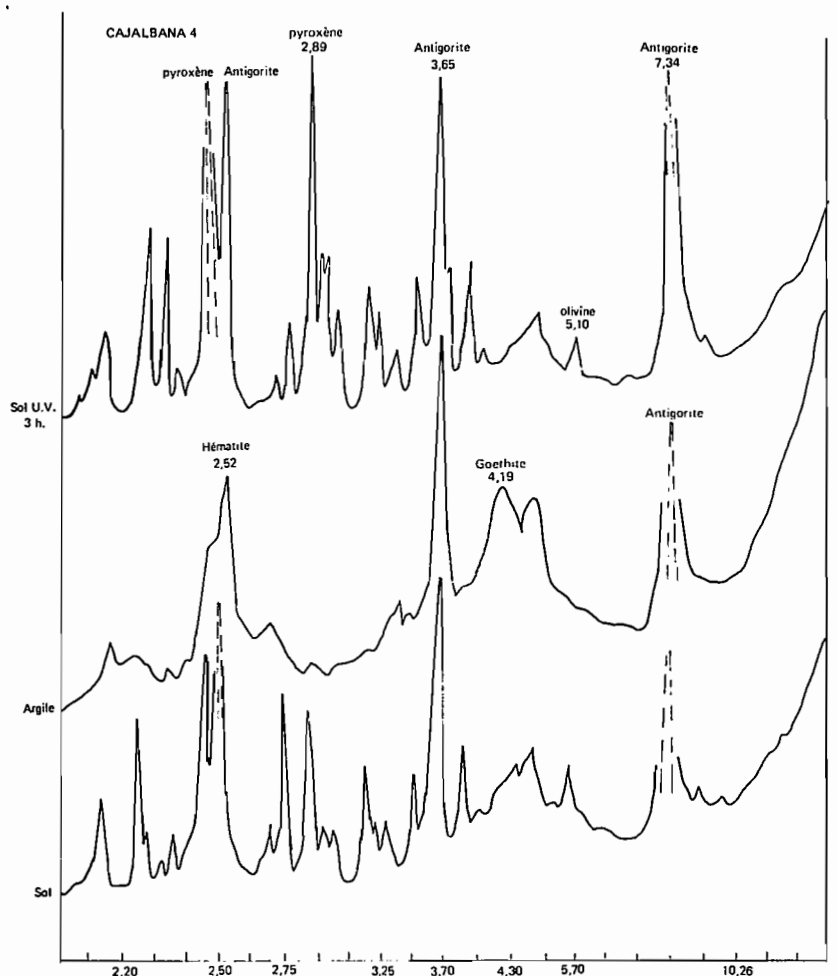


Fig. 5. — Diffraction des rayons X sur l'échantillon CAJ 4 (sol, argile et sol traité suivant méthode d'Endredy).

est due à la présence de minéraux primaires résistants.

Les teneurs en oxydes de fer libre déterminées par les méthodes de routine du laboratoire donnent des résultats insuffisants. Les trois extractions habituelles ne peuvent donner les résultats cherchés. En opérant avec huit extractions au lieu de trois, on obtient de meilleurs résultats, mais encore insuffisants (fig. 1), puisque la courbe de dissolution n'indique pas encore d'infléchissement. Le diagramme X des échantillons déferriés par un mélange d'acide oxalique-oxalate d'ammonium irradié par les ultraviolets montre encore des pics de goethite importants, alors que ceux de l'hématite ont disparu. Une technique comportant une attaque acide énergique doit être utilisée pour ces sols en abandonnant les techniques trop douces au dithionite de sodium.

Quoi qu'il en soit, la goethite et l'hématite en proportions variables sont les constituants ferru-

gineux dominants. Les teneurs atteignent 50 à 60 % (tableau B).

3° Présence ou absence d'hydroxyde d'aluminium. La présence d'hydroxyde d'aluminium est pressentie par le rapport silice/alumine inférieur à 1,0. Toutefois, le diagramme X du sol total ou de la fraction argile ne permet pas d'identifier avec certitude la présence de gibbsite (la boehmite n'a pas été reconnue). Ce minéral n'est identifiable qu'après une déferriation; les pics 4,8 et 4,3 Å sont alors nettement visibles.

4° Identification des minéraux argileux. La présence de minéraux argileux 1/1 est pressentie aux rayons X, mais leur identification est incertaine. En microscopie électronique, la déferriation permet de reconnaître la kaolinite en petites plaquettes et les tubes d'halloysite.

La présence de minéraux argileux 2/1 en faible

quantité est difficile à identifier avec certitude par diffraction des rayons X. Par contre, après déferri-fication, il est possible de reconnaître en microscopie électronique des formes attribuables aux smectites.

La présence d'antigorite est reconnaissable par la forte teneur en magnésium, par le diagramme X ainsi que par la microscopie électronique et micro-diffraction d'électrons.

5° *Le quartz*. Cet oxyde a été identifié par la diffraction des rayons X, dans les échantillons MAD, où il est très abondant (près de 50 % de l'échantillon total). Par contre, il est absent des échantillons CAJ.

6° *Genèse des sols*. Ces deux sols dérivent de roches ultrabasiques. L'une d'elles MAD, est fortement serpentinisée, l'autre, CAJ, ne l'est pas. Ils ont en commun une couleur rouge foncée, une structure polyédrique émousée très fine, une très grande friabilité. L'un contient du quartz en abondance, l'autre de petites concrétions.

Si on ne tient pas compte du résidu à l'attaque triacide, les deux sols ont une composition centésimale très voisine, caractérisée par une teneur en oxydes de fer de l'ordre de 50 à 60 %; ils ont une teneur en silice combinée comprise entre 8 et 15 %, en alumine 7 à 15 %. Les quantités de minéraux

argileux formés sont très faibles : kaolinite, halloysite, smectite et chlorite.

La genèse de ces sols peut être attribuée à une altération très poussée d'une roche ultrabasique où la quantité d'aluminium est très réduite. Cette altération permet l'évacuation de la quasi-totalité de la silice, sauf la quantité nécessaire pour se combiner avec une partie de l'aluminium; le magnésium est également à peu près totalement évacué. Le fer (de l'olivine, de l'hypersthène) va s'oxyder et s'accumuler sous forme d'hématite mais surtout de goethite. Une partie de ces oxydes va se rassembler en petites concrétions.

Mais deux voies sont possibles :

A MADRUGA, il ne subsiste presque pas de magnésium, ni aucun minéral de type antigorite. Par contre, l'abondante silice libérée, n'ayant rien pour se combiner, précipite sous forme de quartz, dans le profil en filonnets quasi verticaux (photo 1).

A CAJALBANA, on n'observe pas d'accumulation de quartz ni dans le profil ni à proximité de celui-ci. Par contre, on observe très près de la roche mère, mêlée à des olivines et pyroxènes, une mince accumulation d'antigorite. Celle-ci disparaît complètement à son tour et il ne reste que des sesquioxydes de fer.

BIBLIOGRAPHIE

- BENNETT (H. H.), ALLISON (R. V.), 1962. — Los suelos de Cuba, com. UNESCO. La Habana trad. de l'ouvrage de 1928.
- CARDENAS (A.), BAISRE (J.), CALZADA (N.), 1978. — El complejo de adsorción de los suelos ferríticos de Cuba. Ciencias de la Agricultura. Acad. Cienc. Cuba (La Havane), 3 : 81-86.
- Comité de Pédologie et cartographie des sols (C.P.C.S.), 1963. — Classification des sols. Mimeo, Grignon, 96 p.
- DE ENDREY (A. S.), 1963. — Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method. *Clay min. Bull.*, 29, 5 : 209-217.
- F.A.O.-U.N.E.S.C.O., 1975. — Carte mondiale des sols au 1/5.000.000. Légende, 62 p.
- Instituto de Suelos, 1975. — Segunda clasificación genética de los suelos de Cuba. Acad. Cienc. Cuba (La Havane). Ser. Suelos 23 : 1-25.
- SAAVEDRA (G.), PEREZ (A.), 1976. — Physical geographical characteristics of ferritic soils of the Cajalbana plateau and its typical vegetation of pines. *Transac. 23rd Intern. Geogr. Congr. Moscow*, t. 4 : 177-179.
- SÉGALEN (P.), 1970. — L'extraction du fer libre des sols à sesquioxydes par la méthode d'ENDREY par irradiation à l'ultra-violet des solutions oxaliques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* VIII, 4 : 483-496.
- SÉGALEN (P.), 1971. — La détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.* IX : 3-27.
- U.S.D.A., 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agriculture handbook* 435, 754 p.
- ZONN (S. V.), CABRER MESTRE (P.), VASQUEZ (L. R.), 1966. — Attempt of compiling a genetic classification of Cuban Soils. *Sov. Soil. Sci.* : 1361-1371.



Photo 1. — Madrugá, précipitations de quartz secondaire.



Photo 2. — Cajalbana, blocs de péridotite recouverts d'antigorite.

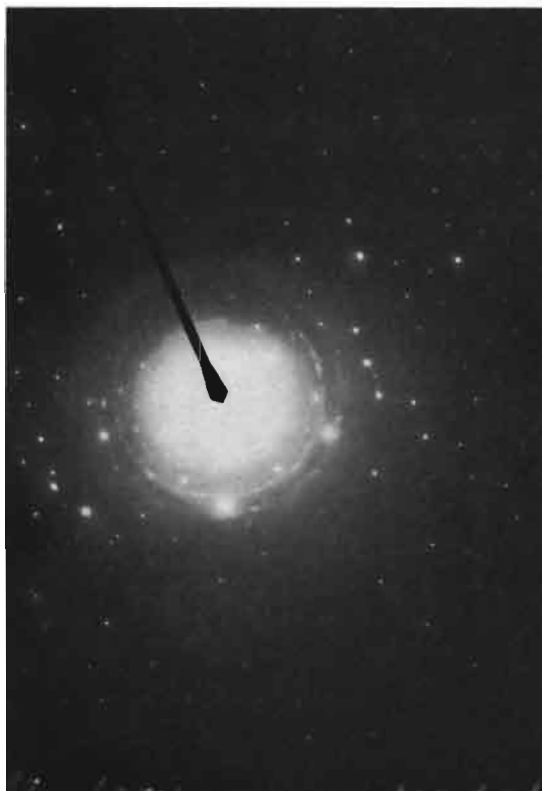
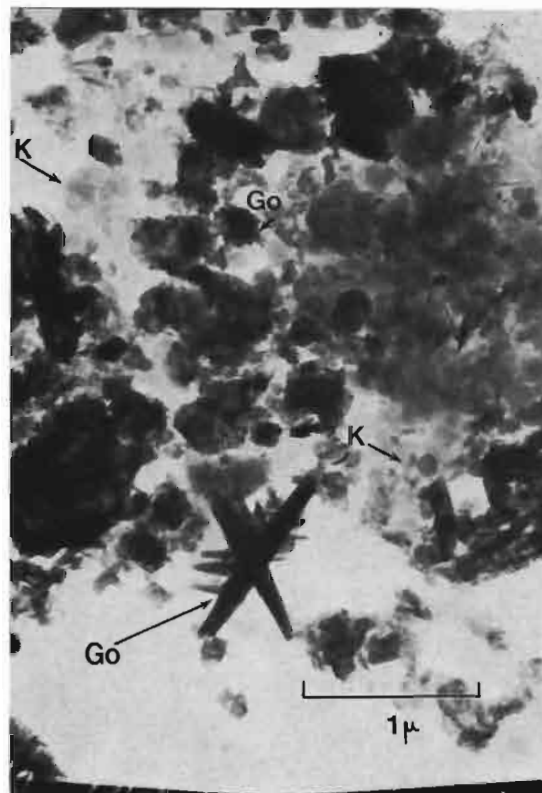
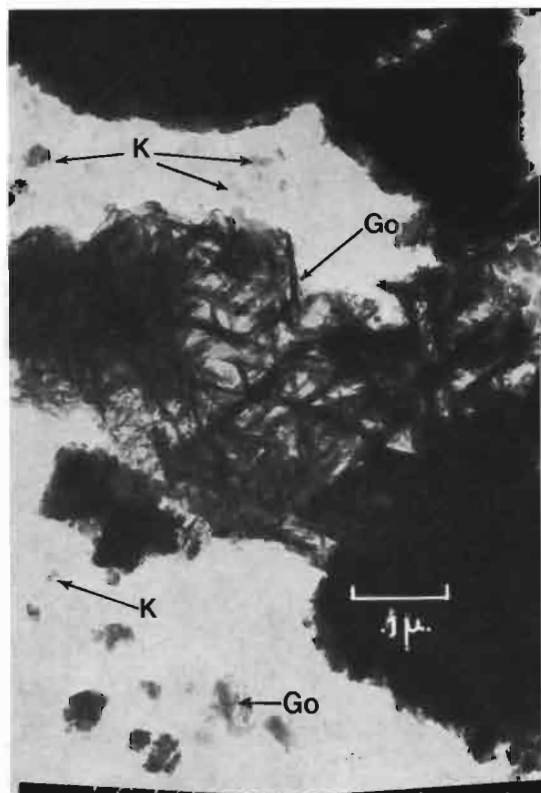


Planche I : MAD 42($\times 10\ 000$) déferrifié Tamm.

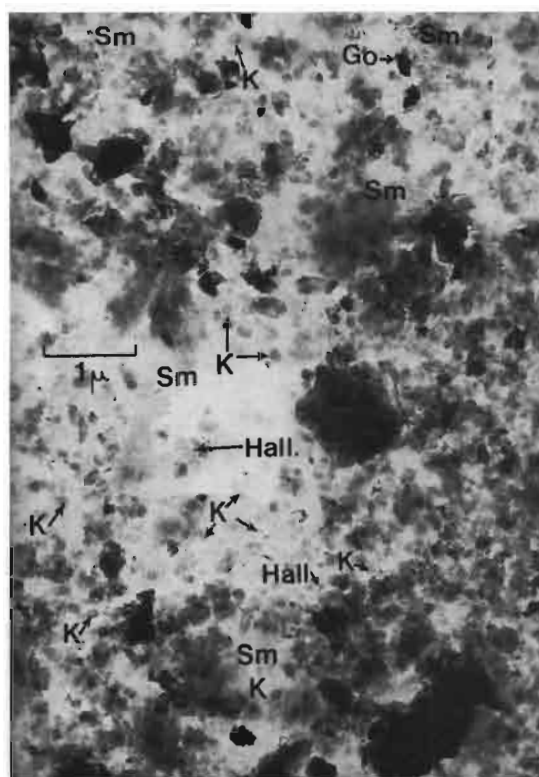
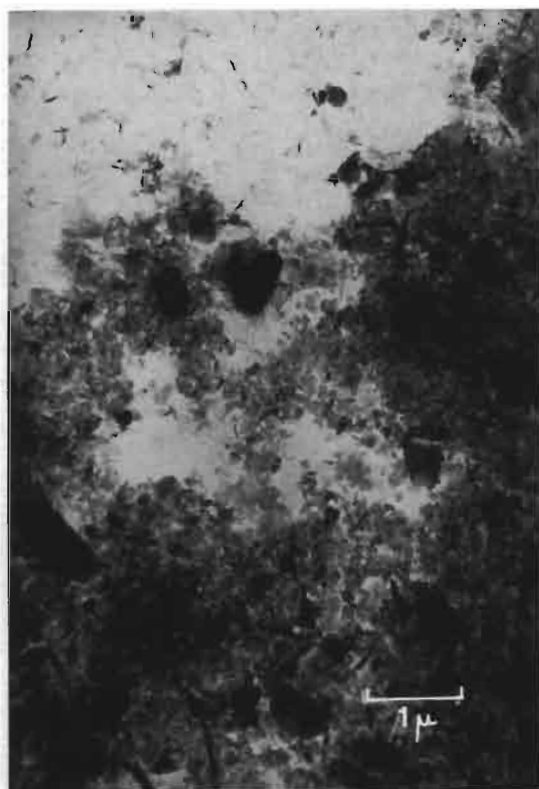
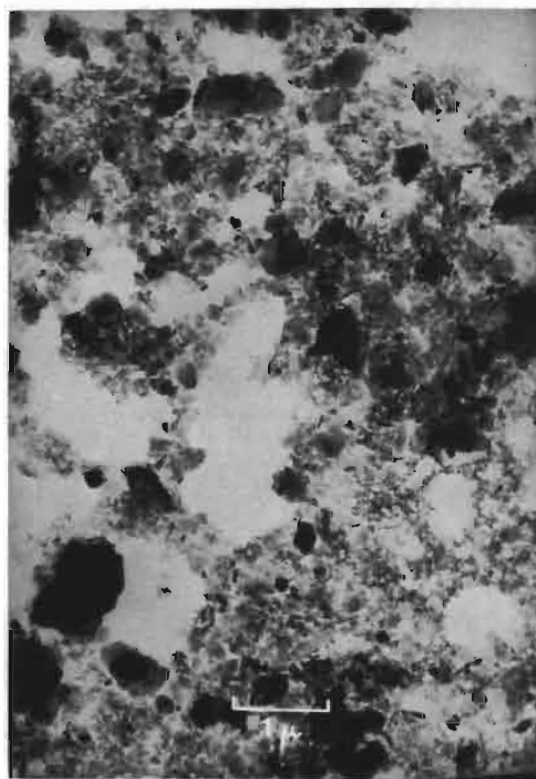
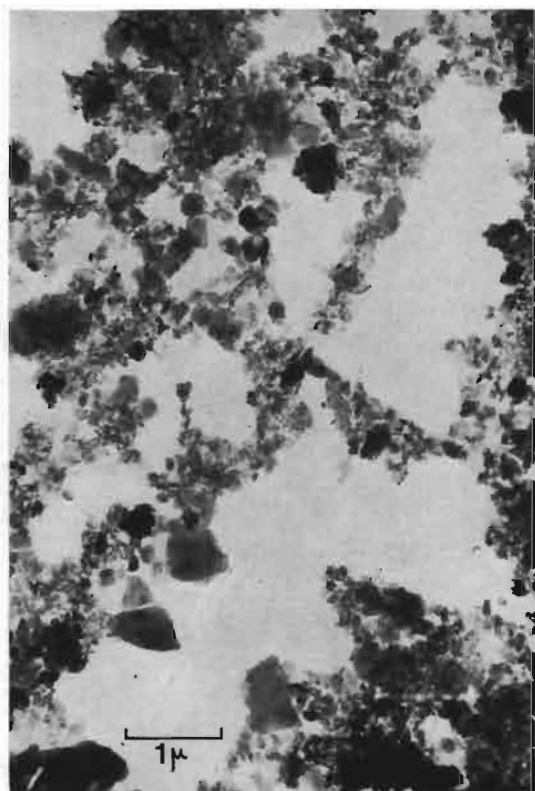


Planche II : MAD 42($\times 10\ 000$) déferriifié Tamm.

Quelques conclusions des recherches françaises sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale

Eric ROOSE

Pédologue O.R.S.T.O.M., 24, rue Bayard, 75008 Paris

RÉSUMÉ

Depuis trente ans, les chercheurs de l'O.R.S.T.O.M. et du G.E.R.D.A.T. ont abordé les problèmes posés par l'évolution des sols tropicaux en Afrique Occidentale par trois voies : les enquêtes agropédologiques, l'étude de bilans de matières et l'expérimentation poussée sur des processus précis. Ces recherches ont montré combien la dynamique de l'eau et des matières organiques, les propriétés chimiques, biologiques et physiques, les transferts de matières et la différenciation morphologique de la partie supérieure du profil peuvent évoluer rapidement et profondément lors de la mise en culture. Le climat étant très agressif, des processus tels que l'appauvrissement en particules fines, la lixiviation des bases et l'acidification, l'hydromorphie et l'érosion sont très rapides par rapport à l'allération. Il apparaît que la dynamique de l'eau et de l'érosion dépend étroitement des caractéristiques de la surface du sol (pellicule de ballance, taux d'éléments grossiers et de matières organiques, stabilité des agrégats, rugosité de la surface) plus que de la nature des horizons profonds et du type pédogénétique de sol. Ces connaissances sont précieuses pour interpréter les cartes pédologiques en vue de l'aménagement agricole.

SUMMARY

Since 30 years, the researchers of O.R.S.T.O.M. and G.E.R.D.A.T. are studying the actual evolution of the West African soils by three approaches : agropedologic investigations, matter balance and elaborate experimentations for definite pedological processes. The data show how the chemical, physical and biological properties and the morphology of the topsoil can be modified quickly and deeply after reclaiming for cultivation. Pedological processes like impoverishment in fine particles, bases washing and acidification, waterlogging and erosion are much more rapid than mineral weathering. It appeared that erosion and water dynamic are more depending on the characteristics of the topsoil (sealing crust, gravel and organic matter content, aggregate stability, roughness of the surface, macroporosity) than of the nature of the deep horizons and the pedogenetic soil type. These knowledges are precious for interpretation the soils maps for the agricultural management.

Introduction

La contribution des pédologues de l'O.R.S.T.O.M. à l'inventaire des sols tropicaux, à leur étude morphologique, cartographique et génétique, est bien connue du public scientifique (cf. les exposés de

G. MILLOT et R. TAVERNIER). Parallèlement à ces études classiques, quelque peu statiques, il est rapidement apparu nécessaire d'étudier l'évolution des sols, car après leur mise en culture, bien des propriétés évoluent rapidement. C'est l'un des mérites de Georges AUBERT que d'avoir encouragé

les pédologues de l'O.R.S.T.O.M. et du GERDAT à entreprendre des recherches sur la dynamique des sols, d'une part pour adapter les techniques de mise en valeur agricole aux conditions climatiques particulièrement agressives des régions tropicales, et d'autre part, pour préciser certains processus pédogénétiques et en évaluer la vitesse. En effet, il s'est avéré qu'en milieu cultivé, certains processus sont accélérés et de ce fait, sont plus faciles à aborder à une échelle de temps acceptable pour des recherches sur le terrain.

Ces études font appel à des méthodes différentes.

La plupart des études agropédologiques procèdent par enquête à un instant donné ou par comparaison dans le temps des propriétés physiques et chimiques des horizons superficiels de sols identiques soumis à des traitements différents; par exemple, un sol sous végétation naturelle est comparé à ce même sol défriché et cultivé depuis plusieurs années, selon des techniques différentes. Citons au Sénégal, les études effectuées par COINTEPAS, FAUCK, MOUREAUX et THOMANN ou encore par CHARREAU, NICOU, POULAIN, BLONDEL et SIBAND; en Côte d'Ivoire, les travaux de DABIN, BERGER, LATHAM, CHABALIER, de BLIC, MOREAU, GODEFROY, LE BUANEC, JADIN, OLLAGNIER, OCHS, etc.

Une autre approche, plus expérimentale, tente d'établir à l'échelle de la parcelle, le bilan des transferts hydrologiques et biologiques de matières (solubles et solides) à travers la partie la plus active du profil (les 2 mètres supérieurs). Ce programme a démarré en 1964 en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta (ROOSE, 1967 à 1980), puis s'est étendu au Gabon (COLLINET, 1971-74), en Tunisie (PONTANIER, DELHUMEAU, DELHUME, LOYER : 1972-80) et en Guyane (BLANCANEUX, 1980).

Enfin, divers processus élémentaires ont fait l'objet d'analyses fines : l'évolution du profil hydrique (AUDRY au Tchad), l'évolution de la stabilité structurale (COMBEAU et QUANTIN en RCA, G. MARTIN au Congo, MOREAU et de BLIC, TALINEAU, BONZON, FILLONEAU en Côte d'Ivoire), la porosité et la compacité (HUMBEL au Cameroun), l'hydromorphie (VIZIER au Tchad et à Madagascar), l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels (ROOSE en Côte d'Ivoire, MULLER au Cameroun), l'évolution du ruissellement et de l'érosion sous l'influence de la battance des pluies et des techniques culturales (ASSELIN, COLLINET, LAFFORGUE, ROOSE et VALENTIN en Côte d'Ivoire, Haute-Volta et Niger).

Comme il n'est pas possible de rapporter dans cette courte note tous les résultats concernant l'évolution actuelle des sols, nous nous limiterons à résumer quelques conclusions importantes des recherches effectuées par les chercheurs de l'O.R.S.T.O.M. en Afrique de l'Ouest. En revanche, nous signalons

dans la bibliographie un échantillon plus large des travaux français sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale et centrale.

QUELQUES RÉSULTATS

1 Les enquêtes

Quel que soit le milieu, toutes les études montrent une chute très rapide du taux de matières organiques du sol (20 à 60 % du stock initial) durant la première année, liée essentiellement au mode plus ou moins brutal de défrichement et de préparation du sol à la culture; ensuite la perte de matières organiques est plus progressive, jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre (après une dizaine d'années) en relation avec le nouveau pédoclimat imposé (couvert végétal moins dense et moins durable), mais aussi avec le type de culture et de techniques culturales (retour au sol de résidus organiques plus ou moins abondants). Des modifications qualitatives des matières organiques du sol ont aussi été observées [27, 29] ainsi qu'une chute brutale de l'activité micro-biologique et mésofaunique [27, 65]. Par ailleurs, il a été montré qu'en milieu tropical humide, il est possible de relever rapidement (2-3 ans) le niveau des matières organiques du sol par l'implantation de cultures fourragères fertilisées [55, 68]. En revanche, il semble qu'en zone tropicale sèche, la jachère herbacée soit incapable d'améliorer substantiellement le bilan humique du fait des feux de brousse [17]. Tout se passe comme si chaque type de sol possédait d'une part, un stock de matières humiques stables, et d'autre part, une quantité de matières organiques variant rapidement en fonction de la masse et de la qualité des résidus retournant chaque année au sol; c'est pourquoi les sols forestiers sont plus riches en matières organiques que les savanes et, *a fortiori*, que la plupart des sols sous cultures peu fertilisées.

Suite à la perte substantielle de matières organiques, les propriétés physiques du sol se dégradent rapidement : diminution sensible de la porosité (surtout la macroporosité), naissance d'une pellicule de battance en surface, compaction des horizons profonds, développement d'une discontinuité texturale, porale et hydraulique à la base de l'horizon labouré (parfois, semelle de labour). Cette dégradation entraîne des phénomènes d'engorgement de plus en plus fréquents dans les horizons superficiels des sols de plateau et de plaine, le développement du ruissellement et de l'érosion sur les pentes (même faibles), l'engorgement sous la boue et les sables des zones basses. Plus la mécanisation est lourde et les interventions fréquentes, plus la dégradation des propriétés physiques du milieu est rapide. Par

contre, les méthodes traditionnelles de défrichement sont plus progressives et laissent en place le réseau racinaire et une couverture végétale non négligeable à la surface du sol (racines, brindilles, recrû forestier et mauvaises herbes); l'organisation porale et l'activité biologique se maintiennent pendant 2 à 4 années, ce qui retarde la dégradation du sol, inévitable sous ces climats agressifs lorsque les apports de matières organiques fraîches tarissent sensiblement.

La richesse en éléments nutritifs décroît également lors du défrichement et de l'exploitation agricole, surtout en ce qui concerne les éléments facilement assimilables par les plantes ou lixiviables par les eaux de drainage et de ruissellement. Les carences phosphatées, souvent les plus visibles, sont facilement corrigées par des apports modestes (20 à 50 unités/an). Des quantités plus importantes d'azote et de potasse sont nécessaires dans certains cas (300 à 700 unités sous bananeraie et cultures fourragères intensives). Mais le point le plus grave à long terme, est certainement la perte continue et régulière des bases (surtout Ca et parfois K), la diminution de la capacité d'échange de cations et du taux de saturation du complexe absorbant entraînant inéluctablement une acidification du sol qui peut avoir, une fois dépassés certains seuils, des conséquences fâcheuses sur la nutrition des plantes (toxicité manganique et surtout aluminique si le pH est inférieur à 4,5). Sur les champs soumis à la culture depuis plus de 10 ans, on a observé également un appauvrissement en particules fines (0 à 50 microns) des horizons superficiels, une diminution de la capacité de stockage de l'eau utile et des éléments nutritifs ainsi que la réduction du profil exploité par les racines à l'horizon ameubli artificiellement (15 à 25 cm).

Les modifications les plus importantes ont été observées dans les dix ou les 25 premiers centimètres du sol. On a pu quelquefois déceler des changements de compacité ou de structure jusqu'à 40 ou 60 centimètres de profondeur. A plus long terme cependant, il est probable que des modifications se poursuivront plus profondément puisque les profils hydriques et les profils de température sous culture ne rejoignent ceux qu'on observe sous forêt qu'au-delà d'un mètre [15, 18].

En définitive, tous les auteurs concluent qu'il est possible d'instaurer, en zone tropicale sèche ou humide, un système de culture intensif et continu fournissant souvent de hauts rendements agricoles tout en préservant le capital foncier [15, 37, 45, 55]. Pour faire face à certaines circonstances défavorables (climat agressif, sol pauvre et dépourvu de réserve minérale), il faut choisir soigneusement le type de culture et les techniques adaptées aux conditions écologiques et économiques : maintenir le sol

couvert, assurer aux plantes une nutrition minérale équilibrée et au sol des restitutions importantes de matières organiques, limiter le travail du sol aux façons culturales indispensables au développement harmonieux des racines, à l'alimentation hydrique et à la limitation des mauvaises herbes. Il faut enfin concevoir un aménagement général du bassin versant en vue de la conservation de l'eau et des sols.

2 Les bilans de matière [53-65]

En Afrique occidentale, des surfaces importantes du vieux continent sont enfouies sous une couverture pédologique kaolinitique très ancienne puisqu'il faut 20.000 à 100.000 ans, selon les auteurs, pour réaliser l'altération complète d'un mètre de granite. Or actuellement, le fonctionnement de la partie supérieure des profils pédologiques (ainsi d'ailleurs que le paysage tout entier) est en relation étroite avec le bioclimat. En particulier, les profils des sols ferrallitiques sont relativement homogènes et le drainage vertical est abondant dans la zone forestière subéquatoriale de la basse Côte d'Ivoire. Par contre, les profils des sols ferrugineux tropicaux sont contrastés, le drainage profond est réduit et le ruissellement important dans la zone des savanes soudano-sahéliennes à climat tropical sec du centre de la Haute-Volta. De plus, des enquêtes ont montré que l'aménagement à des fins agricoles de ces sols tropicaux entraîne des modifications profondes des matières organiques et de la structure, de la dynamique de l'eau et des transferts de matières.

Sans vouloir nier l'importance de l'héritage historique sur la maturation de l'épaisse couverture pédologique, une démarche expérimentale a été tentée sur le terrain, visant à quantifier les différents éléments du bilan de matières (eau, solubles, solides) en vue de préciser l'influence du bioclimat et de l'homme sur la dynamique actuelle de la partie supérieure du profil, la plus sensible aux modifications extérieures. Des mesures continues sur le terrain des principaux processus pédogénétiques ont été effectuées dans des conditions expérimentales bien différenciées du point de vue :

— *de la végétation* : de la forêt dense à différents types de savanes et de cultures (et même le sol nu) ;

— *du climat* : du pôle subéquatorial au pôle tropical sec, les précipitations annuelles diminuent de 2100 à 700 mm, l'ETP augmente de 1250 à 1900 mm, les températures maximales augmentent, ainsi que la durée et la sévérité de la saison sèche. L'agressivité des pluies diminue, mais celle de la chaleur desséchante augmente ;

— *du paysage* : l'inclinaison des versants diminue, mais leur longueur augmente,

— *des sols* : les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étudiés sont kaoliniques, riches en sables quartzux, lixiviés en bases et appauvris en particules fines dans les horizons superficiels, mais les teneurs en matières organiques, la macroporosité et la stabilité de la structure diminuent de la zone forestière à la zone la plus sèche, de même que sous cultures sarclées ;

— *des roches mères* : des granito-gneiss en majorité, mais aussi des schistes chloriteux et des sédiments argilo-sableux tertiaires dans la région forestière.

Pour évaluer les mouvements de l'eau et de ce qu'elle transporte, les observations ont été effectuées en continu sur des petites parcelles homogènes, à l'aide de dispositifs respectant le mieux possible l'architecture de la porosité des sols, tels que les cases d'érosion, les parcelles de lessivage oblique et les lysimètres monolithiques. Parallèlement furent observées les remontées de terre fine par les vers et les termites et la production végétale des savanes, les précipitations et le pluviollessivage. Plutôt que des mesures très précises de laboratoire sur échantillons plus ou moins remaniés, ou des mesures de terrain limitées dans le temps, on a procédé à un grand nombre d'observations pendant 4 à 11 cycles saisonniers sur de petites parcelles situées à mi-versant, lesquelles représentent mieux la dynamique actuelle que les sols des sommets (influence importante de l'héritage) ou des bas-fonds (hydromorphie et colluvionnement). De très nombreuses analyses d'eau, de sols et de végétaux ont été réalisées sur place au Laboratoire Central de l'O.R.S.T.O.M. à Adiopodoumé (Côte d'Ivoire).

L'IMPORTANCE DES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION EN NAPPE

Sous végétation naturelle, le ruissellement (K_r annuel = 0,2 à 2 %) et l'érosion (E = 20 à 200 kg/ha/an) sont très limités tant que le sol est bien couvert : les variations interannuelles sont aussi importantes que les différences observées entre le milieu forestier et les savanes soudanaises. Les phénomènes d'érosion ne deviennent notables que dans les steppes sahéliennes à couverture végétale discontinue (maximum dans les zones de 400 à 700 mm de pluie). Les feux de brousse (surtout tardifs) modifient fortement la couverture végétale et sont susceptibles d'augmenter sérieusement les risques d'érosion.

En milieu cultivé, on peut observer de grandes différences d'érosion en fonction du type de culture : comme les pluies sont très agressives (3 à 50 fois plus en Afrique de l'Ouest qu'en milieu tempéré), l'influence du couvert végétal est très marquée sur les équilibres biologiques, les bilans hydriques,

chimiques et colloïdaux ainsi que la structure du sol.

Tout transport de terre nécessite une source d'énergie. Dans les paysages ondulés du vieux bouclier africain, la cause première de l'érosion est l'énergie des gouttes de pluie qui disperse les particules formant les agrégats et les mottes ; le ruissellement n'est qu'un agent de transport, mais à mesure que la pente des versants augmente, son apport d'énergie croît et la forme que prend l'érosion passe de la nappe à la rigole, puis à la ravine.

L'analyse des résultats à l'aide de l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960) montre l'ordre d'importance des facteurs conditionnels : le couvert végétal peut modifier l'érosion de 1 à 1/1000, la pente de 0,1 à 5 (rarement 20), l'érodibilité du sol de 1/3 à 1/100 et les techniques antiérosives de 1 à 1/10. Les pertes en terre représentent le produit de l'agressivité des pluies par les 4 facteurs de résistance du milieu et non leur somme, car si l'un d'eux s'annule, l'érosion tend effectivement vers zéro. Il convient d'en tenir compte pour organiser la lutte antiérosive en combinant les méthodes biologiques les plus efficaces en zone humide (couvrir le sol, aménagement avec bandes d'arrêts isohypses, restitution maximale des matières organiques) et en réservant les méthodes mécaniques (terrasses et petits barrages) aux zones trop sèches pour que les plantes se développent rapidement (pluie < 400 mm) et aux montagnes (glissement de terrain).

La comparaison des transports liquides et solides à l'échelle de la parcelle et des bassins versants de différentes tailles est délicate à cause de l'influence majeure du couvert végétal. Lorsque la végétation est homogène et peu dégradée, l'érosion sur petits bassins (< 10 km²) est voisine de celle qu'on observe sur parcelles. Par contre, si la végétation est hétérogène, les transports solides dépendent de la position des zones peu couvertes par rapport au réseau hydrographique. De toute façon, chaque échelle d'observation présente un intérêt, mais pour des buts différents.

LE BILAN HYDRIQUE

Les précipitations, le ruissellement, le drainage et les variations saisonnières du profil hydrique ont été mesurés sur le terrain pendant 4 à 11 années, dont un bon nombre furent plus sèches que la normale. Pour généraliser le bilan aux cas des années normales, décennales sèches ou humides, on a appliqué la méthode de Thorntwaite modifiée [65].

Le drainage profond en année normale passe de 40-45 % sous forêt dense subéquatoriale, à 25-35 % sous savane soudanaise et tend à s'annuler au pôle sahélien (fig. 1) ; à ce pôle sec, où les pluies sont

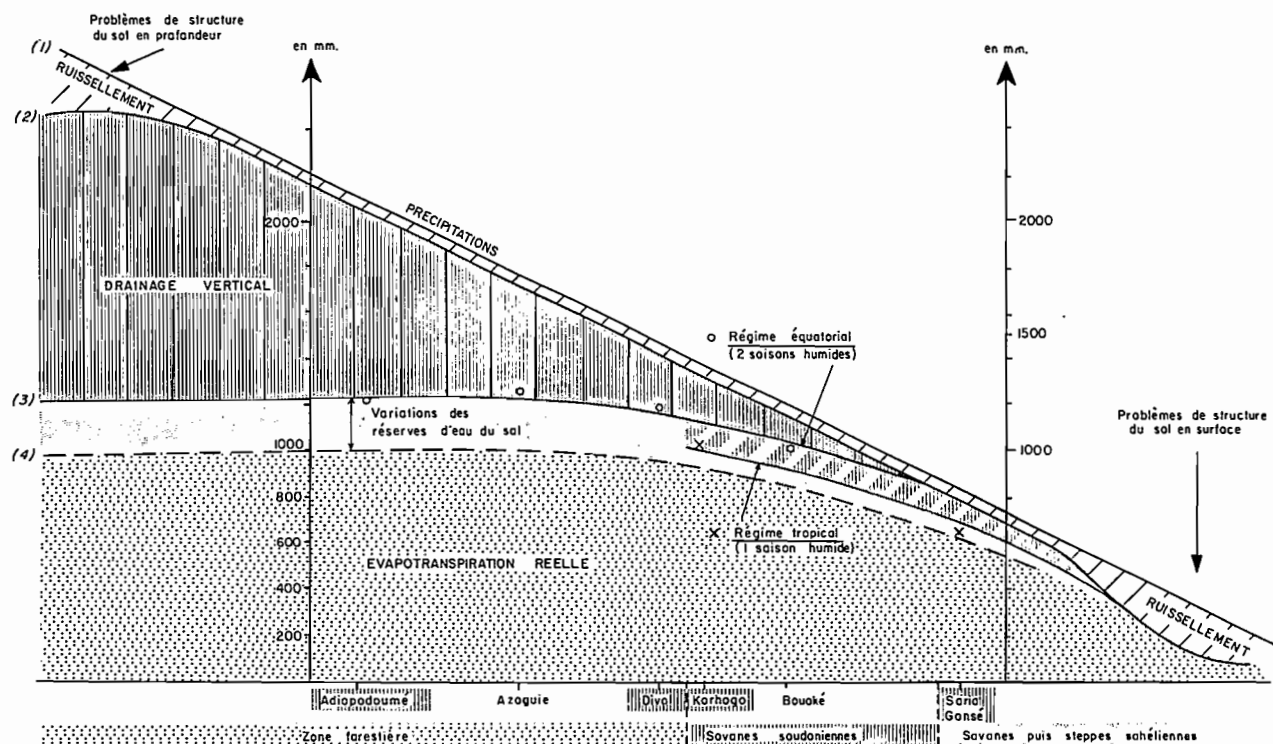


Fig. 1. — Évolution du bilan hydrique sous végétation naturelle en fonction du climat en milieu tropical.

généralement inférieures à 700 mm, le front d'humectation du sol ne dépasse pas chaque année 50 cm de profondeur, tant le pouvoir évaporant de l'air et le ruissellement superficiel sont élevés. En revanche, au pôle humide, l'ETP est limitée à 1250 mm de telle sorte qu'une masse d'eau considérable est disponible pour percoler à travers le profil jusqu'à la nappe phréatique (ou pour ruisseler si la surface du sol est dégradée). L'influence de la roche mère et de la topographie sur ce bilan est assez complexe. Par contre, le rôle de la végétation est important et d'autant plus important que le climat est plus sec. La forêt évapotranspire 150 à 200 mm de plus que les autres couverts végétaux; elle dessèche le sol plus profondément. Elle modifie surtout la charge solide des eaux et la répartition des écoulements dans l'année : plus la végétation est dense, plus l'écoulement retardé (le plus utile) est favorisé et les écoulements de pointe (les plus dangereux pour l'érosion) sont laminés. Les résultats montrent enfin qu'on ne peut négliger le ruissellement dans les modèles d'estimation du bilan hydrique : il varie de 1 % en milieu naturel à plus de 40 % sous culture sarclée.

LA CHARGE SOLUBLE DES EAUX

Dans la séquence étudiée, la charge soluble des eaux superficielles varie plus en fonction du volume

des écoulements et des saisons qu'en fonction des stations elles-mêmes. La tendance à la dilution en milieu humide est compensée par des apports atmosphériques croissants (proximité de l'océan et de la forêt) et par une activité biologique plus poussée : seule la silice des eaux de nappe augmente nettement avec l'aridité du milieu. Les eaux de pluie se chargent au contact des végétaux (surtout des arbres) et des couches humifères du sol, puis se déchargent avant d'atteindre la nappe phréatique. Cependant, la silice et le sodium, qui ne sont pas piégés par les végétaux ni par le sol, présentent des teneurs croissantes jusqu'aux sources.

L'influence de la roche mère sur la charge soluble des eaux superficielles est réduite, car il ne reste pratiquement pas de minéraux altérables dans les horizons traversés. La kaolinite est stable; le quartz est soluble dans certaines circonstances au sein des horizons superficiels, mais pas dans la zone d'altération. Les sesquioxides migrent principalement sous forme colloïdale ou particulaire.

L'aménagement du milieu naturel (défrichement, feu, fertilisation) peut modifier considérablement la charge soluble des eaux superficielles, en changeant l'équilibre entre l'offre (minéralisation des matières organiques et engrais) et la demande d'éléments nutritifs (fixation par le sol et besoins des plantes).

Il en résulte des risques de lixiviation des éléments les plus solubles (N, Ca, Mg, K, Na, Cl, SO_4) et une tendance à l'acidification des sols soumis à une fertilisation intense, trop souvent incomplète. Les risques de pollution des nappes sont cependant réduits tant que les apports ne dépassent pas les besoins des plantes, ni la capacité de fixation du sol (fractionnement) et qu'ils sont effectués en dehors des périodes les plus humides de l'année. L'azote et les bases sont très mobiles alors que le phosphore est rapidement insolubilisé par le fer et l'alumine libres, abondants dans les sols tropicaux. Le potassium est très mobile dans les sols kaoliniques, tandis qu'il est rapidement rétrogradé dans les sols riches en argiles 2/1.

La composition chimique des eaux superficielles dépend donc surtout des phénomènes biochimiques et de l'aménagement du milieu par l'homme, tandis qu'au niveau de la nappe, elle est contrôlée par les lois d'équilibre physico-chimique entre les minéraux et les solutions.

LE BILAN GÉOCHIMIQUE

Dans le milieu naturel, le bilan n'est équilibré que grâce aux apports atmosphériques et au recyclage rapide des éléments concentrés à la surface du sol par diverses activités biologiques (pluviolessivage, minéralisation des litières, remontées par la flore et la mésofaune). Qu'un processus quelconque interrompe la chaîne biologique, et la productivité végétale diminue, tandis que les horizons superficiels du sol se dégradent progressivement. Ainsi, lorsque le feu parcourt régulièrement la savane, il empêche la régénération des arbres, abîme les touffes d'herbes, réduit la variabilité végétale : finalement, le taux de matières organiques du sol diminue, tandis que son état de compaction et son érodibilité augmentent.

L'arbre joue en quelque sorte le rôle du « bas de laine » pour accumuler les substances nutritives disponibles : sa destruction lors du défrichement entraîne nécessairement une certaine dégradation du milieu, mais celle-ci peut être plus ou moins rapide et profonde en fonction de la brutalité des techniques de défrichement et du mode d'exploitation. En définitive, ce milieu tropical, où les minéraux altérables sont profondément enfouis sous la couverture kaolinique, est très fragile et difficile à mettre en valeur à cause de l'agressivité climatique ; de fortes pluies succédant à de fortes chaleurs, les matières organiques sont rapidement minéralisées laissant un substrat pédologique pauvre chimiquement et fragile dans ses structures. L'exploitation agricole exige des apports minéraux et organiques réguliers pour compenser les pertes de nutriments (exportation par les récoltes, érosion, lixiviation) et la réduction de certaines activités biologiques.

L'utilisation rationnelle des résidus de culture au champ semble essentielle, tant pour réduire les exportations minérales que pour assurer un niveau raisonnable du taux de matières organiques dans les horizons superficiels du sol, une structure correcte et une bonne résistance à l'érosion, une capacité suffisante de stockage de l'eau utile et des nutriments.

LES CONSÉQUENCES DES TRANSFERTS PARTICULAIRES SUR LA MORPHOLOGIE DES PROFILS

Dans la séquence bioclimatique étudiée, l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels est généralisé sur les couvertures kaoliniques : cet appauvrissement provient de l'action combinée de l'érosion en nappe sélective, des remontées de matériaux fins par la mésofaune et du lessivage des éléments colloïdaux. La destruction des argiles ne semble se produire qu'en milieu chaud beaucoup plus humide (pluie > 3000 mm).

En milieu forestier subéquatorial d'Afrique, le drainage vertical est si important que le lessivage vertical à floculation diffuse domine les mouvements obliques de surface et développe des profils peu différenciés et profondément appauvris (cf. fig. 2). Sous savane brûlée et sous culture sarclée le lessivage est aussi abondant, mais largement dépassé par les phénomènes d'érosion sélective. Sur forte pente ou en milieu dégradé, l'érosion devient décapante, ce qui limite l'épaisseur des horizons appauvris. Si le lessivage des éléments colloïdaux est plus apparent en milieu tropical sec, c'est que ceux-ci se déposent à faible profondeur, faute de drainage profond : ils forment des profils très différenciés. Dès lors se développe un horizon compact à faible profondeur, lequel favorise les mouvements obliques superficiels de l'eau et de tout ce qu'elle peut transporter.

Pour le lessivage comme pour l'érosion en nappe, l'énergie des gouttes de pluie intervient pour désagréger les particules, tandis que l'eau assure leur transport. Par contre, les matières organiques peuvent jouer des rôles divergents : les acides fulviques maintiennent les colloïdes kaoliniques à l'état dispersé et assurent leur migration, tandis que d'autres formes de matières organiques protègent la stabilité de la structure et ralentissent l'érosion.

Les activités de la mésofaune sont multiples et très variables d'une espèce à l'autre. Retenons leur influence positive sur la macroporosité, la capacité de filtration et l'homogénéisation des horizons superficiels. Notons également que la remontée de matériaux riches en particules fines au-dessus de la litière et des lits de gravières, assure l'évolution de l'appauvrissement et la possibilité d'une érosion en milieu naturellement protégé.

En conclusion, on peut retenir quelques ensei-

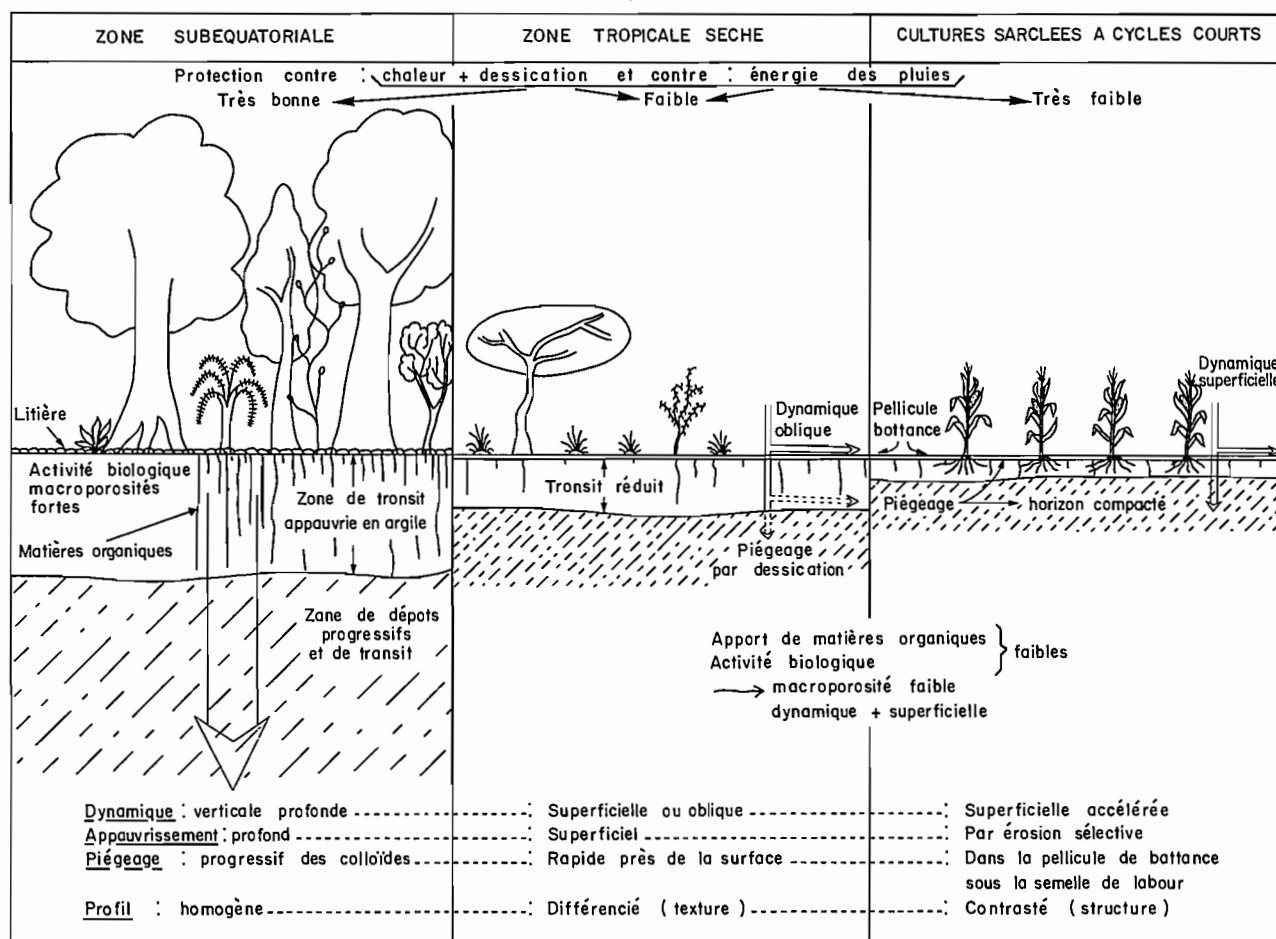


Fig. 2. — Influence biologique et climatique sur l'évolution du profil pédologique d'une couverture kaolinique en milieu tropical

gnements généraux de ces études de bilans. Nous n'en soulignerons que trois :

— tout d'abord le rôle essentiel de l'homme, des activités biologiques et du bilan hydrique au niveau du sol, sur la différenciation des profils développés sur des couvertures kaolinitiques ;

— ensuite la place prépondérante des transferts de matière sous forme solide, même si la part des migrations solubles augmente à mesure que le climat devient plus humide ;

— enfin, la lixiviation des nutriments et l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels sont des processus pédologiques très rapides par rapport à l'altération ferrallitique et sont encore accélérés par la plupart des techniques de culture utilisées par l'homme.

3 Aperçu sur quelques études particulières

DYNAMIQUE DE L'EAU ET TRANSFERTS DE MATIÈRE À LA SURFACE DU SOL

L'influence de l'énergie dissipée par la battance des gouttes de pluie et par le ruissellement sur la dynamique de l'eau et les transferts de matière à la surface du sol, a été analysée en détail à l'occasion d'une douzaine de campagnes de mesures au simulateur de pluies (type Swanson, sur 2 parcelles de 50 m²) et à l'infiltromètre à aspersion (type Asseline et Valentin, sur 1 m²) depuis la basse Côte d'Ivoire jusqu'au Niger. L'intérêt de ces dispositifs [1, 67] mobiles est de maîtriser certains paramètres difficiles à isoler sous pluies naturelles, de simuler des séries d'averses de fréquence rare, de soumettre des parcelles

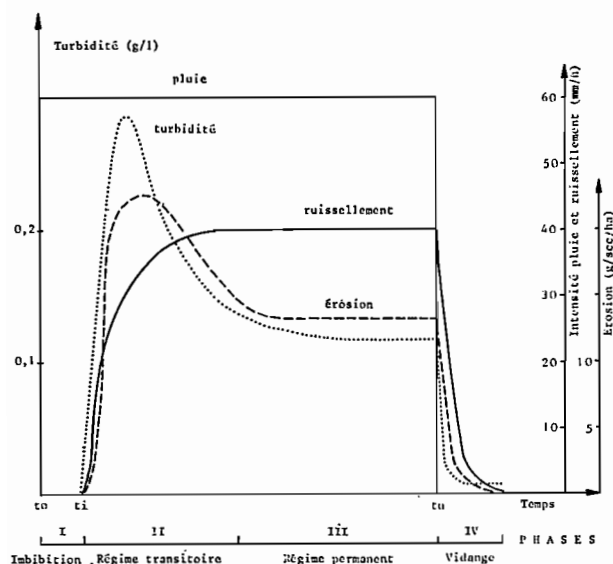


Fig. 3. — Représentation graphique d'une averse simulée.

éloignées à des tests semblables et d'étudier ainsi la variabilité dans le temps et dans l'espace de l'infiltrabilité et de l'érodibilité.

Quatre phases ont été analysées séparément durant l'averse (cf. fig. 3) :

- une phase d'imbibition, avant que ne commence le ruissellement,
- une phase de transition durant laquelle l'infiltration diminue,
- une phase de régime permanent où le ruissellement semble stable,
- une phase de vidange, après que la pluie a cessé.

Pour un site expérimental donné (un type de sol, de pente et de végétation), il est apparu que l'état d'humectation antérieur à l'averse, la rugosité, le taux d'éléments grossiers et l'état structural de la surface du sol ont une influence nette sur la hauteur des pluies d'imbibition, sur les caractéristiques de la loi d'infiltration et sur les valeurs caractéristiques de la charge solide [22, 23, 34, 35]. La faible perméabilité des horizons profonds n'intervient de façon notable que très rarement.

La charge solide des eaux de ruissellement évolue de diverses façons au cours du temps. Le plus généralement, elle croît jusqu'à un maximum situé avant la phase de régime permanent, pour décroître ensuite jusqu'à un niveau constant. La turbidité des eaux est déterminée à la fois par le volume des écoulements (effet dilution, ou au contraire, force érosive propre du ruissellement), par la quantité de

matériaux meubles disponibles et par l'énergie dissipée par la battance des pluies au niveau du sol nu. Pendant les deux premières phases se produit une mobilisation des éléments meubles (sédiments délaissés à la fin de l'averse précédente, rejets biologiques, dépôts éoliens, ou mottes pulvérisées par les techniques culturales), en même temps que la désagrégation des mottes par la battance des pluies. Une fois atteint le régime permanent du ruissellement, la turbidité et le taux d'érosion par minute décroissent (les particules meubles ont été évacuées), puis se maintiennent à un niveau stable. On peut supposer que ce nouvel équilibre est atteint par suite de l'absorption partielle de l'énergie cinétique des gouttes par la lame d'eau qui recouvre localement la surface du sol [23, 72].

Cependant, il arrive quelquefois durant la phase de régime permanent sur des parcelles particulièrement exposées à l'agressivité des pluies, que la turbidité augmente brutalement et dépasse le premier pic au cours d'averses suffisamment longues. Cette modification de la turbidité peut s'expliquer soit par la formation de rigoles qui drainent la nappe ruissellante entraînant à nouveau la battance sur les parties exondées [23], soit par le lâchage brutal des couches superficielles qui ont atteint le point de liquidité [61].

Tant que le ruissellement s'écoule sous forme de minces nappes, il ne peut accumuler beaucoup d'énergie, car les forces de frottement sont trop élevées; c'est pourquoi, dans plusieurs essais sous pluie naturelle, on n'a pas observé d'augmentation de l'érosion avec la croissance de la longueur de la pente. Mais, dès que les écoulements se hiérarchisent et se concentrent dans des rigoles, ils acquièrent une énergie propre et développent des forces de cisaillement capables de creuser des rigoles et des ravines. En limitant la largeur des champs cultivés, on n'arrête pas l'érosion par battance sur les parcelles, mais on limite l'accumulation de l'énergie du ruissellement dans les rigoles.

En conclusion, dans la zone soudano-sahélienne, l'influence de la nature du sol (sols bruns subarides, vertiques ferrugineux tropicaux, de texture très diverse) sur les paramètres du ruissellement et de l'érosion paraît très faible en regard des caractéristiques de surface (pellicule de battance, voile sableux éolien ou présence d'éléments grossiers). En revanche, dans les zones soudaniennes et guinéennes, la répartition des différents types de sols ferrallitiques le long des versants conditionne pour une large part la dynamique de l'eau et les transferts de matière : les sols de bas de pente sont beaucoup plus instables. Les activités biologiques (surtout sous forêt) et la présence d'un mulch gravillonnaire limitent le ruissellement et l'érosion. Le travail du

sol améliore la macroporosité et la rugosité des horizons superficiels; par ailleurs, il diminue leur cohésion, accentue les contrastes structuraux et crée une discontinuité hydraulique dans le profil. Son influence bénéfique sur l'infiltration n'est que fugace (durant les 60 à 150 premiers mm de pluie) si la structure des mottes n'est pas stable et si la végétation, ou les cailloux, ne recouvrent pas rapidement le sol; dans le cas contraire, le ruissellement et l'érosion sont souvent plus élevés que sur les parcelles non travaillées. Parmi les techniques culturales testées, seul le paillage (sur sol aéré) a une action efficace et durable sur le ruissellement et l'érosion. Le buttage cloisonné permet le stockage et l'infiltration des pluies jusqu'à un seuil donné (guère plus de 60 mm), puis, sous l'effet des débordements, il provoque l'apparition d'un ruissellement concentré, ravinant, à caractère catastrophique. Ces mesures réalisées sur des parcelles de tailles différentes (1 à 50 m²) ont donné des résultats convergents : elles semblent pouvoir fournir des données intéressantes sur la dynamique de l'eau à l'échelle du versant et des petits bassins [13].

L'ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE LORS DE LA MISE EN CULTURE

Au cours d'une étude sur l'évolution des sols ferrallitiques sous l'effet de la mise en culture dans la région centrale de Côte d'Ivoire, il a été constaté que le défrichement mécanisé, réalisé au début de la grande saison des pluies, avait provoqué une dégradation rapide et importante de la stabilité structurale de la partie supérieure du sol.

Les effets de l'infiltration d'une lame d'eau de 50 mm sur la stabilité structurale des 30 premiers centimètres du sol ont été étudiés sous forêt et sous savane sur ces parcelles travaillées ou non à l'aide d'une lame de couteau. A la suite de l'humectation, la stabilité structurale diminue davantage sous savane que sous forêt [41] : mais dans les deux cas, la diminution est bien plus importante dans le sol ameubli que dans le sol naturel. Les tests de stabilité des agrégats ont montré que l'infiltration entraîne

essentiellement une diminution de la « non-mouillabilité » dans le sol naturel, tandis qu'elle diminue, en outre, la cohésion dans les sols travaillés.

Le travail du sol accroît donc la vulnérabilité des agrégats envers l'action déstabilisante de l'eau et accélère la dégradation de la structure des horizons superficiels [7, 8].

Conclusions

Les études de dynamique actuelle des sols basées sur l'expérimentation ont depuis longtemps rendu services au développement de l'agriculture moderne. Plus récemment, elles ont provoqué un regain d'intérêt depuis qu'il est apparu qu'elles étaient aptes à mieux faire comprendre certains processus pédogénétiques dont les horizons superficiels sont le siège, tels que appauvrissement en particules fines par lessivage ou par érosion sélective, lixiviation des bases, hydromorphie, dégradation de la structure, etc.

Ces processus sont généralement accélérés sous culture. Or en Afrique occidentale comme en de nombreuses régions tropicales, l'agriculture traditionnelle était ou est itinérante, c'est-à-dire qu'après défrichement par le fer et le feu, la terre était soumise à quelques années d'exploitation, suivies de 20 à 50 ans de repos. Une grande partie des terres ont ainsi été défrichées 2 à 4 fois par siècle. Il est donc raisonnable de penser que la dynamique des horizons superficiels des nappes kaoliniques (réputées très anciennes) est en équilibre avec le bioclimat actuel puisqu'il faut de 1 à 20 siècles pour atteindre, au rythme actuel, le stade d'appauvrissement en particules fines et de lixiviation en bases qu'on observe aujourd'hui.

Étant donné l'importance des caractéristiques des horizons superficiels pour la dynamique de l'eau, pour la croissance des végétaux et pour la conservation des sols, ces études de dynamique peuvent aider les pédologues cartographes à définir des unités étroitement adaptées à la mise en valeur agricole en tenant compte de l'évolution probable de leurs propriétés après la mise en culture.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ASSELINE (J.), VALENTIN (C.), 1978. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol.*, 15, 4 : 321-350.
- [2] AUDRY (P.), 1967. — Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture (arachide et péni-cillaire). Coll. Fertilité des sols tropicaux, Tananarive ; 11/67 ; communication 129, t. II : 1591-1614.
- [3] AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F. X.), ROOSE (E.), VIZIER (J.-F.), 1973. — Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Définition, méthodologie, techniques, limitations actuelles. Quelques voies de recherches possibles (suite). In : *Bull. du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols*, n° 2, juil. 1973.
- [4] BERGER (J. M.), 1964. — Profils culturaux dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 2, 1 : 41-69.
- [5] BERLIER (Y.), DABIN (B.), LENEUF (N.), 1956. — Comparaison physique, chimique et microbiologique entre les sols de forêt et de savane sur les sables tertiaires de la basse Côte d'Ivoire. Congr. Sci. Sol, Paris, vol. 6 : 499-502.
- [6] BLANCANEUX (Ph.), 1979. — Dynamique de sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique. Rapport O.R.S.T.O.M., 162 p. inédit.
- [7] BLIC (Ph. de), 1976. — Le comportement de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu naturel. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 14, 2 : 113-130.
- [8] BLIC (Ph. de), MOREAU (R.), 1977. — Évolution des caractères structuraux des sols ferrallitiques sous l'effet d'une mise en culture mécanisée récente en Côte d'Ivoire préforestière. Comm. I.I.T.A. : Ibadan, 6-10/2/77, O.R.S.T.O.M., Abidjan, 15 p.
- [9] BLONDEL (D.), 1971. — Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal. In : *Agron. Trop.*, vol. XXVI, n° 12, déc. 1971 : 1303-1333.
- [10] BONFILS (P.), CHARREAU (C.), MARA, 1963. — Études lysimétriques au Sénégal. *Agron. Trop.* 19, 11 : 29-62.
- [11] BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (G.), PONTANIER (R.), 1979. — Étude d'un milieu représentatif du sud tunisien (type Segui) : la citerne Telman. Rapport de synthèse 1972-77. Ministère Agric. Tunisie/O.R.S.T.O.M., 87 p.
- [12] BOYER (J.), 1970. — Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. O.R.S.T.O.M., Paris, 175 p.
- [13] CASENAVE (A.), GUIGUEN (N.), 1978. — Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers. Campagne 1977. O.R.S.T.O.M.-C.I.E.H., 60 p.
- [14] CHABALIER (P.), 1976. — Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote-engrais dans un système sol-plante. Thèse Doct. Ing. Fac. Sciences Abidjan, n° 33, 139 p.
- [15] CHARREAU (C.), FAUCK (R.), 1970. — Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa. *Agron. Trop.* 25, 2 : 151-191.
- [16] CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. — L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.* 26, 9, 903-78 ; 11 : 1183-1247.
- [17] CHARREAU (C.), 1972. — Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agron. Trop.*, 27, 9 : 905-929.
- [18] CHAUVEL (A.), 1966. — Études physiques des sols de Séfa. — O.R.S.T.O.M., Dakar, 36 p.
- [19] CHAUVEL (A.), 1977. — Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. *Trav. Doc. O.R.S.T.O.M.*, n° 62, 532 p.
- [20] COINTEPAS (J.-P.), 1960. — Bilan des études chimiques et pédologiques entreprises à la Station Expérimentale de Séfa. O.R.S.T.O.M., Tunis, 110 p.
- [21] COLLINET (J.), 1971. — Premiers résultats de l'exploitation d'une parcelle de lessivage oblique dans la région de Libreville (Gabon). Rapport O.R.S.T.O.M., Libreville, 15 p. *multigr.*
- [22] COLLINET (J.), LAFFORGUE (A.), 1979. — Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 129 p.
- [23] COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. — Analyse de différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 17, 4 : 283-328.
- [24] COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1963. — Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 1, 3 : 17-26.

- [25] DABIN (B.), 1964. — Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 11, 1 : 29-40.
- [26] FAUCK (A.), 1956. — Conservation des sols et mise en valeur agricole en région tropicale. Congr. Int. Sci. Sol, 6, Paris, vol. D, 591-595.
- [27] FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (C.), 1969. — Bilans de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agron. Trop.*, 24, 3 : 263-301.
- [27 a] FOURNIER (F.), 1960. — Climat et Érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Universitaires de France, Paris, 202 p.
- [28] GERDAT, 1975. — Intensification de l'agrosystème en cultures assolées dans le centre de la Côte d'Ivoire. Bilan des résultats de la recherche. — Rapport GERDAT (I.E.M.V.T.-I.R.A.T.-I.R.C.T.), 55 p.
- [29] GODEFROY (J.), 1974. — Évolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Doct. Ing. Nancy. 1, C.N.R.S., A.O. 9296, 166 p.
- [30] HUMBEL (F. X.), 1974. — La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol.*, XII, 1 : 73-101.
- [31] HUMBEL (F. X.), 1976. — L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. *O.R.S.T.O.M.*, Paris, 310 p.
- [32] JADIN (P.), 1972. — Étude de la fertilisation minérale des cacaoyers en Côte d'Ivoire à partir du diagnostic « sol ». *Café, cacao, thé*, 16, 3 : 204-218.
- [33] JAMET (R.), 1975. — Évolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Loudima (Congo). *Cah. O.R.S.T.O.M., ser. Pédol.*, vol. XIII, nos 3-4 : 235-253.
- [34] LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs du ruissellement sous pluies simulées. — *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. hydrol.*, vol. 13, 3 : 195-237.
- [35] LAFFORGUE (A.), 1977. — Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données sous pluies simulées. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. hydrol.*, 14, 4 : 299-344.
- [36] LATHAM (M.), 1969. — Contribution à l'étude de l'influence du facteur sol sur le développement du cotonnier en Côte d'Ivoire. *O.R.S.T.O.M.*, Abidjan, 66 p. *multigr.*
- [37] LE BUANEC (B.), 1971. — Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du centre Côte d'Ivoire. Bilan général. *I.R.A.T.*, Bouaké, 32 p.
- [38] LE BUANEC (B.), 1974. — Observations sur l'ameublissement du profil cultural en sols ferrallitiques. Son incidence sur les caractéristiques du sol et sur la croissance des plantes cultivées annuelles. *Agron. Trop.* 29 : 1079-1099.
- [39] MARTIN (G.), 1963. — Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 1, 2 : 8-14.
- [40] MARTIN (G.), 1968. — Synthèse agropédologique sur les sols de la vallée du Niari. In : *Quinze ans de travaux et recherches dans la vallée du Niari*, vol. 3 : 53-145.
- [41] MOREAU (R.), 1978. — Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 16, 4 : 413-424.
- [42] MOREL (R.), QUANTIN (P.), 1964. — Les jachères et la régénération du sol en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale. *Agron. Trop.* 19, 2 : 105-136.
- [43] MOULO (N.), 1974. — Étude comparative des sols sous forêt et sous bananiers sur schistes à Azaguié d'après deux toposéquences (basse Côte d'Ivoire). Rapport de stage. *O.R.S.T.O.M.*, Abidjan, 99 p.
- [44] MULLER (J.-P.), 1974. — Transport et accumulation de matière en domaine ferrallitique camerounais. Premières données morphologiques et interprétations. *O.R.S.T.O.M.*, Yaoundé, 21 p.
- [45] OLLAGNIER (M.), LAUZERAL (A.), OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1978. — Évolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. *Oléagineux*, 33, 11 : 537-544.
- [46] PICHOT (J.), 1971. — Étude de l'évolution du sol en présence de fumures organiques ou minérales. Cinq années d'expérimentation à la station de Boukoko (Rép. Centrafricaine). *Agron. Trop.*, 26, 6 : 736-754.
- [47] PIERI (C.), 1979. — Étude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal, à l'aide de capteurs en céramique poreuse. *Agron. Trop.*, 34, 1 : 9-22.
- [48] POULAIN (J.-F.), ARRIVETS (J.), 1971. — Effets des principaux éléments fertilisants autres que l'azote sur les rendements des cultures vivrières de base (sorgho, mil, maïs) au Sénégal et en Haute-Volta. Séminaire C.S.T.R./O.U.A., Dakar, juil. 1971, *I.R.A.T.*, Ouagadougou, 31 p.
- [49] POULAIN (J.-F.), 1975. — Bilan des travaux réalisés par l'I.R.A.T. de 1962 à 1974 au Mali dans le domaine de l'agronomie. *I.R.A.T.*, Mali, 22 p.
- [50] POULAIN (J.-F.), 1978. — Synthèse des résultats agronomiques obtenus de 1971 à 1977. *I.R.A.T./H.V. Ministère Dév. Rural H.V.*, 175 p.
- [51] RAUNET (P.), 1971. — Contribution à l'étude pédologique des terres de Barre au Dahomey et au Togo sur les points d'essai de l'I.R.A.T. *I.R.A.T.*, 119 p.
- [52] ROOSE (E. J.), 1967. — Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. — *Agron. Trop.*, 22, 2 : 123-152.
- [53] ROOSE (E. J.), 1970. — Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Deux années de mesure sur parcelle expérimentale. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 8, 4 : 469-482.

- [54] ROOSE (E. J.), 1972. — Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne. Comm. Journées d'Études du Génie Rural, Florence, sept. 1972 : 417-441.
- [55] ROOSE (E. J.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse doct. ing., fac. Sci. Abidjan, O.R.S.T.O.M., Abidjan, 125 p.
- [56] ROOSE (E. J.), LELONG (F.). — Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.*, 18, 4 : 365-374.
- [57] ROOSE (E. J.), 1976. — Use of the Universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. S.S.S.A. Special Publication, n° 21 : 60-74.
- [58] ROOSE (E. J.), 1977. — Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Trav. Doc. O.R.S.T.O.M.*, Paris, n° 78, 108 p.
- [59] ROOSE (E. J.), GODEFROY (J.), 1977. — Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Azaguié : 1966-1973. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 15, 4 : 67-94.
- [60] ROOSE (E. J.), 1978. — Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du centre Haute-Volta. Gonsé : campagnes 1968 à 1974. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 16, 2 : 193-223.
- [61] ROOSE (E. J.), ASSELINE (J.), 1978. — Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. II : Les charges solides et solubles des eaux de ruissellement sur sol nu et diverses cultures d'ananas. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 16, 1 : 43-72.
- [62] ROOSE (E. J.) *et al.*, 1979. — Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne. Saria (Haute-Volta : campagne 1971-74). O.R.S.T.O.M., Paris, 123 p.
- [63] ROOSE (E. J.), 1979. — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du nord de la Côte d'Ivoire (Korhogo : 1967-75). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 17, 2 : 81-118.
- [64] ROOSE (E. J.), 1980. — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sablo-argileux très désaturé, sous cultures et sous forêt dense humide subéquatoriale du sud de la Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1964-75. O.R.S.T.O.M., Paris, 204 p.
- [65] ROOSE (E. J.), 1980. — Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse doct. ès Sci., Univ. Orléans, 587 p.
- [66] SIBAND (P.), 1974. — Évolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. — *Agron. Trop.*, 29, 12 : 1228-1248.
- [67] SWANSON (N. P.), 1965. — Rotating-boom rainfall simulator. — *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* 8 : 71-72.
- [68] TALINEAU (J.-C.), BONZON (B.), FILLONNEAU (C.), HAINNAUX (G.), 1979. — Contribution à l'étude d'un agrosystème prairial dans le milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire. I : Analyse de quelques paramètres de l'état physique du sol. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 17, 2 : 141-157.
- [69] TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHE (J.), NICOU (R.), 1964. — Bilan d'une rotation quadriennale sur sole de régénération au Sénégal. *Agron. Trop.*, 19, 12 : 1033-1072.
- [70] TRAN. THANH-CANH, 1972. — Étude comparative des sols sous forêt et sous liévca sur sables tertiaires à l'Anguédédou. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 157 p. *multigr.*
- [71] VALENTIN (C.), 1978. — Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 150 p.
- [72] VALENTIN (C.), 1978. — Problèmes méthodologiques liés à la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. Comm. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg, 20-23/9/78. O.R.S.T.O.M., Abidjan, 11 p.
- [73] VALENTIN (C.), ROOSE (E. J.), 1980. — Soil and water conservation problems in pineapples plantations of south Ivory Coast. Comm. Conservation 80, Silsoe, juil. 80.
- [74] VIZIER (J.-F.), 1971. — Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 9, 4 : 373-397.
- [75] VIZIER (J.-F.), 1978. — Étude de la dynamique du fer dans les sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Étude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 16, 1 : 23-42.
- [76] WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1960. — A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th Intern. Congr. Soil Science, vol. I : 418-425.

Toxicité apparente de certains engrais phosphatés et intoxication manganique induite

J. BOYER

Pédologue O.R.S.T.O.M., 24, rue Bayard, 75008 Paris

RÉSUMÉ

On constate parfois dans les sols à réaction acide, des effets dépressifs de certains engrais phosphoriques, principalement du superphosphate concentré (dil triple) et du phosphate d'ammonium. L'auteur passe en revue les diverses théories émises à ce propos : acidification prononcée du sol, intoxication par l'ammoniac (NH_3 et NH_4OH) ou les ions ammonium, synergie phosphore-manganèse induisant des toxicités manganiques. Comme le plus souvent ces accidents ont pour cause le manganèse et qu'un apport de calcium supérieur à celui de phosphore (rapport molaire $\text{Ca/P} > 1$) les évite à coup sûr, l'interaction phosphore-manganèse en semble la cause la plus probable.

Introduction

On a remarqué que parfois l'application d'engrais phosphatés à un sol notoirement déficient en phosphore produisait un résultat exactement opposé à celui qu'on pouvait logiquement attendre : non seulement la production des cultures n'était pas stimulée, mais on constatait des effets dépressifs, à la fois sur le volume des récoltes et sur l'état sanitaire de l'appareil végétatif, pouvant aller jusqu'à la mort de la plante.

Sans vouloir remonter trop loin dans le temps, il suffit de signaler les observations de ROSSITER (1951 et 1955) sur *Trifolium subterraneum* et orge en Australie, et de WARREN et BENZIAN (1959) sur lupin en Angleterre, pour montrer que ce phénomène existe en pays tempérés. Quant au domaine tropical, STEPHENS (1966) a noté que des applications annuelles de 180 kg de P_2O_5 à l'hectare (sous forme de superphosphate concentré) faites pendant trois années

consécutives sur cotonnier poussant dans les sols ferrallitiques de l'Ouganda non seulement ne faisaient pas progresser les rendements en coton-graines, mais les déprimaient assez rapidement. Terman (1960) a également remarqué que le cotonnier réagissait très mal au superphosphate triple dans les sols acides du sud des U.S.A., alors que, dans l'ordre, maïs, blé, céréales secondaires et surtout plantes fourragères y étaient de moins en moins sensibles. BOYER (1967) étudiant les résultats d'un essai d'engrais NPK sur arachide à Madagascar est amené à en déduire l'existence d'une interaction négative des engrais azotés et phosphatés (ici du supertriple), situation paradoxale car cette interaction est normalement positive. ENSMINGER, HOOD et WILLIS (1965) et ADAMS (1966) ont noté que le phosphate d'ammoniac pouvait inhiber la germination du cotonnier en Alabama. COELHO et VERLENGIA rapportent que l'épandage en couverture de phosphate bi-ammonique sur céréales dans le sud du Brésil engendre

parfois un phénomène s'apparentant à une toxicité du phosphore pour ces plantes et ils constatent eux-mêmes cette toxicité sur pommes de terre.

A ces quelques exemples relevés dans la littérature agronomique — et on n'a point cherché ici à en dresser une liste exhaustive —, il faut ajouter les innombrables essais d'engrais phosphatés qui « n'ont rien donné »; très généralement l'expérimentateur s'est contenté d'en faire une relation dans un rapport interne sans juger ses observations dignes d'une publication, faute de pouvoir fournir d'explication cohérente d'un effet au mieux nul, au pire dépressif.

Ce sera le but de cet article d'essayer de montrer le cheminement des expériences et déductions qui finit par aboutir à une explication apparemment valable de ce phénomène étrange dans des sols qui, répétons-le, présentent de très sérieuses déficiences en phosphore.

Notons tout de suite, pour une meilleure compréhension de ce qui va suivre, que l'engrais employé dans les expériences citées est le superphosphate concentré (45 % P_2O_5) ainsi que le phosphate d'ammonium, et que le sol, sauf exceptions dont on verra plus loin la signification, possède toujours une réaction acide (pH 5,0 à 5,5), parfois très acide (pH 4,0 à 5,0).

QUELQUES TENTATIVES D'EXPLICATION

Si STEPHENS (1966) s'est refusé à commenter l'action dépressive, mentionnée ci-dessus, du supertriple mis à fortes doses dans un sol d'Ouganda, d'autres auteurs ont tenté de donner des explications de ce phénomène. Lorsqu'il analyse l'essai d'engrais (cité plus haut) sur arachide à Madagascar, BOUYER (1967) constate une carence du sol en potassium et en conclut qu'elle empêche phosphate et azote de développer l'interaction positive habituelle. COELHO et VERLENGIA qui, rappelons-le, ont utilisé du phosphate bi-ammonique dans les sols ferrallitiques de l'état de São Paulo, ne savent trop quel facteur incriminer pour expliquer l'action dépressive et même toxique de cet engrais : une libération brutale d'ammoniac gazeux qui aurait « brûlé » les racines ou, plus vraisemblablement, une acidification supplémentaire d'un sol déjà acide dû au seul apport d'anions par le phosphate (PO_4^{---} évidemment, mais aussi NO_3^{--} provenant de la transformation de NH_4).

Un phénomène similaire est décrit par ROUTCHENKO et DELMAS (1963) dans un milieu bien différent, les sols sableux (2,5 % d'argile) et acides (pH 4,5) du sud-ouest de la France : la localisation d'un engrais contenant P et NH_4 à proximité des semences de maïs peut entraîner des effets dépressifs

sur ces plantes; il s'agirait ici, d'après les auteurs, d'une toxicité ammoniacale due à NH_4 dans des conditions peu favorables à la nitrification (sol acide à pH 4,5 et température très fraîche). Quoi qu'il en soit, ces accidents ne se manifestent plus dès que le pH, après chaulage, atteint 6,0 (JUSTE, *com. pers.*).

Un certain nombre d'auteurs américains ayant remarqué que le phosphate d'ammoniaque (mono- ou bi-ammonique) pouvait provoquer la mort des plantules de cotonnier peu après la germination, ENSMINGER *et al.* (1965) en voient la cause dans une inhibition de l'absorption du magnésium par un excès de NH_3 , tandis que ADAMS (1966) pense qu'une déficience en calcium — dans la solution nutritive ou dans le sol — en est responsable.

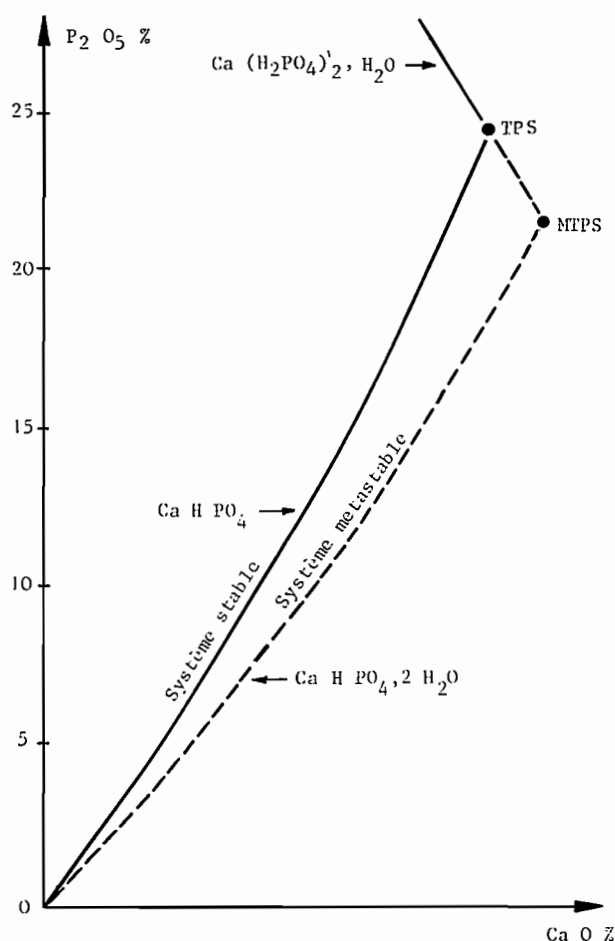
De telles conclusions sont intéressantes, car nous retrouverons plus loin l'importance primordiale du calcium dans la lutte contre ces toxicités, et on sait que le magnésium joue dans le sol un rôle assez voisin de celui du calcium. A noter également que, lorsque le support du végétal est le sol, ce dernier possède toujours une acidité assez forte si l'on constate ces toxicités.

Lorsqu'il n'y a qu'une absence de réponse aux engrais phosphatés (sans toxicité), on a pensé souvent, en milieu tropical principalement, au pouvoir fixateur du sol pour le phosphate, fort important dans le cas des sols riches en sesquioxides (HASEMAN *et al.* (1950); LEAVER et RUSSELL (1957); ROBERTSON *et al.*, 1954; CHANG et CHU, 1961; DABIN, 1963, entre autres); mais, déjà en 1955, certains auteurs ont fait remarquer qu'il est fort exagéré de mettre sur le compte du pouvoir fixateur toutes les anomalies que l'on peut constater dans les essais d'engrais phosphatés (WALKER *et al.*, 1955). On a invoqué également le fait que la réponse des plantes aux engrais phosphatés est très généralement sigmoïdale (TERMAN, 1960; LE MARE, 1968; KELLOG et ORVEDAL, 1969) et qu'un effet nul de la fumure phosphorique pouvait signifier que l'on se trouvait sur une des branches semi-horizontales de la courbe. Cela malgré tout n'explique pas un effet dépressif du supertriple sur les rendements du cotonnier en Ouganda (LE MARE, 1968).

L'HYDROLYSE DU PHOSPHATE MONOCALCIQUE ET LES ACTIONS RÉCIPROQUES DU PHOSPHORE ET DU MANGANÈSE

L'HYDROLYSE DU PHOSPHATE MONOCALCIQUE

Comme le superphosphate triple se révèle le principal, sinon l'unique responsable des réponses aberrantes des plantes à certaines fumures phosphatées, un certain nombre d'agronomes américains



TPS : Solution du point triple (Système stable)

MTPS : Solution du point triple (Système métastable)

Fig. 1. — Isothermes de solubilité dans le système CaO , P_2O_5 , H_2O , d'après BROWN et LEHR (1959).

se sont acharnés, dès le début des années 1950 à étudier le comportement dans le sol du phosphate monocalcique (composant essentiel des superphosphates). Les résultats de ces remarquables travaux se trouvent résumés ci-dessous :

— Le phosphate monocalcique $\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2$ ne se dissout pas dans le sol de façon congruente; il s'hydrolyse en phosphate bicalcique bihydraté $\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (système métastable), en phosphate bicalcique anhydre (système stable) qui restent sous forme de résidus peu solubles, et en une solution acide contenant calcium et phosphore, dite du point triple (« Triple point solution » en anglais) puisqu'elle se forme au point où les trois phases sont en équilibre (cf. figure). (LEHR et BROWN, 1958; BROWN et LEHR, 1959; Terman, Bouldin et LEHR, 1958).

— La proportion du phosphore apporté (sous forme de phosphate monocalcique) qui subsiste dans les résidus ($\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2$ et $\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) peut se calculer assez aisément en fonction du pH du sol et de l'environnement cationique de l'engrais dans le sol, en particulier du taux de calcium (BROWN et LEHR, *op. cit.*) : un ordre de grandeur de 20 à 28 % est assez fréquent dans les sols à pH acide; LE MARE (1975) l'a trouvé expérimentalement de 18,9 % du phosphore apporté dans les sols de l'Ouganda qu'il étudiait. Tout cela implique qu'environ les quatre cinquièmes du phosphore provenant du phosphate monocalcique ont diffusé dans le sol sous forme soluble (solution du point triple).

— La solution du « point triple » possède une très forte acidité : pure, son pH peut atteindre 1,48 presque instantanément et pH 1,01 au bout de 17 jours (LINDSAY et STEPHENSON, 1959). Il est évident que dans le sol, milieu tamponné, les diminutions de pH ne sont pas aussi spectaculaires, mais une belle expérience de LINDSAY et STEPHENSON (*op. cit.*), montre que, dans un sol de pH originel 5,5, l'acidité due aux suspensions hydriques de phosphate se développait considérablement au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'endroit où les granules d'engrais furent placés : pH 3,25 de 10 à 15 cm, pH 2,95 de 0 à 5 cm, cela au bout d'une quarantaine de jours. Il s'agit là naturellement d'une expérience de laboratoire, faite dans un sol déjà de réaction acide. Il n'en reste pas moins que l'on peut craindre une acidification assez prononcée du sol partout où il y a localisation de l'engrais (ici du phosphate monocalcique).

— Les sels présents dans le sol ou apportés par des engrais peuvent modifier considérablement la proportion résidu/solution. En présence de calcaire, le résidu (ici phosphate bicalcique bihydraté) pourra atteindre 92 %; par contre, s'il y a présence de sulfate d'ammoniaque, le résidu ne représentera guère que 2 % du phosphore apporté (et se trouvera principalement sous forme de gypse); avec d'autres sels comme NO_3NH_4 , NH_4Cl , KCl , KNO_3 ..., on obtiendra des valeurs intermédiaires, mais généralement inférieures aux 20 % de résidu cités plus haut (BOULDIN, LEHR et SAMPLE, 1960). Cela signifie en clair que les sels associés au phosphate monocalcique, comme cela se produit dans les engrais NPK dits complets, auront pour effet d'augmenter le pourcentage du phosphore contenu dans la solution point triple, donc de renforcer l'effet acidificateur de cette solution.

— Le phosphate présent dans la solution du point triple possède un haut pouvoir dissolvant pour l'aluminium, le fer, le manganèse ainsi que pour le calcium et le potassium du sol. La solution se sature et se sursature en certains composés phosphatés de

calcium, de fer, d'aluminium et de manganèse. Au fur et à mesure que le pH s'élève, ces composés précipitent, mais c'est le manganèse qui reste le plus facilement en solution; à tel point qu'en sol quelque peu calcaire (pH 7,6), c'est le manganèse qui finalement est le plus aisément dissous (plus rapidement en tout cas que le fer et l'aluminium). Dans tous les cas, même y compris en sol acide, c'est lui qui reste le plus facilement en solution (LINDSAY et STEPHENSON, 1959; LINDSAY, LEHR et STEPHENSON, 1959).

L'ensemble, remarquable, de ces travaux laisse une impression d'inachevé. On y a appris que le phosphate monocalcique libère une solution acidifiante et dissolvante pour certains éléments du sol, mais on ne voit guère à la lumière de ces données, les raisons pour lesquelles cet engrais peut avoir parfois des effets défavorables sur les cultures.

LES ACTIONS RÉCIPROQUES ENTRE PHOSPHORE ET MANGANÈSE

Les fort belles études faites sur le comportement du superphosphate triple (ou concentré) dans le sol ont mis en évidence quelques maîtres-mots : phosphore, solution acide, calcium, manganèse.

Comme il arrive bien souvent, ce sont d'autres agronomes qui vont utiliser ces travaux et trouver un début d'explication au moyen des actions réciproques entre le phosphore des engrais et le manganèse du sol.

A vrai dire, le problème n'est pas à proprement parler nouveau : WALSH *et al.* (1950) signalent deux publications de 1911 et 1912 (KELLEY, 1912), une autre entre les deux guerres mondiales (BORTNER, 1935), où l'on attribue aux engrais phosphatés une diminution de la toxicité manganique du sol, mais aussi quatre autres où on relate le phénomène inverse, tandis qu'un huitième auteur n'a rien constaté du tout; WALSH *et al.* (*op. cit.*) expérimentant par eux-mêmes du phosphate tricalcique sur rutabaga font la preuve, dans ce cas, d'une diminution de la toxicité due au manganèse du sol. Par contre, des agronomes Néo-Zélandais (WALKER, ADAMS et ORCHISTON, 1955) ont fort bien noté un certain nombre d'inconvénients des applications de superphosphate concentré (ou triple) sur trèfle blanc en sol acide (pH 5,3) mais paraissent s'être empêtrés dans des considérations compliquées sur l'antagonisme Mo-Mn, débloquent ou non par le calcium apporté par chaulage.

Et la controverse continue : les anglais CONROY et LAMBE (1962) signalent qu'une application de phosphates (il semble qu'il s'agisse du superphosphate

simple ou enrichi, teneur en P_2O_5 non indiquée) sur un sol de serre, acide et fort pauvre en nutriments minéraux, a provoqué une nette augmentation du rendement des tomates, due en particulier à la diminution de l'alimentation manganique.

Un pas décisif va être franchi par LARSEN (1964) : déjà, en 1956, cet auteur avait trouvé qu'une application de phosphate à forte dose augmentait l'assimilabilité du manganèse, tandis qu'à faible dose elle la diminuait. Reprenant ses expériences sur avoine et betterave à sucre en sols neutres et alcalins connus pour présenter des déficiences en manganèse, il démontre que l'application de superphosphate triple corrige notablement l'insuffisance d'alimentation manganique des cultures. Il voit dans la dissolution du manganèse par la solution du point triple (et il cite à ce propos les expériences de LINDSAY *et al.*, 1959) l'une des causes principales du phénomène. Quelques années plus tard, CHENG et OUELETTE (1971) constatent que des doses appropriées de phosphates de calcium et de potassium ont considérablement réduit les symptômes de toxicité manganique sur les pommes de terre poussant dans les sols acides de l'est du Canada, mais reconnaissent que le superphosphate concentré, à fortes doses, peut provoquer le phénomène inverse.

A peu près au même moment, TRUONG, WILSON et ANDREW (1971), étudient de façon systématique ce même problème avec un certain nombre de légumineuses tropicales poussant à la fois sur solution nutritive et sur les sols acides du Queensland australien : ils arrivent à la conclusion qu'en solution nutritive un apport de calcium diminue la toxicité manganique, mais que de fortes applications de phosphore l'exacerbent; ils concluent par la « présumption d'une interaction Phosphore-Manganèse » au niveau des racines de la plante qui retient vigoureusement sur la production de matière sèche. Très curieusement, dès qu'il s'agit du sol, ils n'osent pas aller jusqu'au bout de leur raisonnement : ils reconnaissent bien sûr qu'un support de calcaire diminue la toxicité du manganèse, même à très faible dose et qu'au contraire le phosphate monocalcique l'exagère; mais ils préfèrent s'en tenir à des considérations peu convaincantes sur les modifications du pH dans des microsites sous l'effet des granules de calcaire ou de phosphate. Autre conclusion sans doute discutable de ces auteurs : dans l'effet antagoniste du phosphore et du calcium sur le manganèse du sol, ils attribuent une grande importance aux niveaux absolus de ces deux éléments (P et Ca), mais assez peu à leurs proportions relatives. Pourtant, ils admettent que l'action du phosphore sur le manganèse se produit de deux façons : augmentation de son assimilabilité dans le sol,

accroissement de son absorption par la plante (1). Peu avant, JUSTE (1970) avait écrit que les plantes intoxiquées par le manganèse présentent toujours des teneurs élevées en phosphore, mais il n'a fait aucune allusion, lui non plus, à une synergie ou une interaction entre ces deux ions.

LES EXPÉRIENCES DE LE MARE : LA SYNERGIE PHOSPHORE-MANGANÈSE

L'HYDROLYSE DU PHOSPHATE MONOCALCIQUE ET L'ALIMENTATION MANGANIQUE DES PLANTES

On a vu précédemment que des agronomes américains avaient démontré le mécanisme des transformations du phosphate monocalcique dans le sol, montrant qu'il s'hydrolysait en phosphate bicalcique relativement peu soluble dans l'immédiat et en une solution dite du point triple, très acidé, rassemblant environ 70 à 80 % du phosphore apporté.

Un dispositif ingénieux a permis à LE MARE (1975 et 1978 a) de séparer ces deux corps et de montrer que la solution du point triple ne provoque pas pour une culture de ray-gras une plus grande disponibilité du manganèse du sol que le phosphate bicalcique. Le fait que ce dernier soit dérivé du phosphate monocalcique ou qu'il soit synthétique — et de ce fait un peu moins soluble — ne change pas grand-chose à son action. La seule différence est que le phosphore de la solution du point triple est plus rapidement absorbé par la plante que celui du phosphate bicalcique.

Si l'on en croit cet auteur, l'hypothèse d'une forte acidification du sol par la seule solution du point triple ne suffit pas à expliquer la plus forte assimilabilité du manganèse, puisque le phosphate bicalcique (résidu de l'hydrolyse du phosphate monocalcique) y contribue également. Notons qu'il s'agit ici de manganèse assimilable à des doses non toxiques pour la plante.

INTERACTIONS PHOSPHORE-MANGANÈSE-CALCIUM

LE MARE (1978 b et c) a bien montré que le cotonnier, plante sensible au manganèse, présente des symptômes d'intoxication manganique en milieu riche en manganèse, qu'il s'agisse d'une solution nutritive ou d'un sol, symptômes d'autant plus intenses qu'on y ajoute plus de phosphore.

Il faut préciser que le sol sur lequel cet auteur a mené ses expériences est un sol ferrallitique du sud de l'Ouganda (station de Namulonge) peu acide (pH H_2O supérieur à 6,0), relativement bien fourni en calcium (8 à 10 me/100 g), mais très riche en manganèse total (2200 à 2900 ppm).

Une deuxième conclusion très importante est que, si le calcium est l'antidote du manganèse ce que l'on savait déjà (TRUONG, WILSON, ANDREW, 1971), les proportions relatives de phosphore et de calcium ont une importance énorme pour contrôler la toxicité manganique induite par le phosphore. Un rapport Ca/P (rapport molaire) inférieur à 1 contrôle fort mal l'absorption du manganèse et sa toxicité, d'autant plus mal que le substrat est plus riche en manganèse. Lorsque ce rapport Ca/P est supérieur à 1, les toxicités manganiques régressent ou n'apparaissent pas.

On conçoit ici toute l'importance de la forme des engrais phosphatés sur la toxicité manganique induite par le phosphore. Avec le phosphate monocalcique $Ca(H_2PO_4)_2$, de rapport molaire Ca/P = 1/2 on pourra craindre que la synergie phosphore-manganèse ne joue à plein et ne déclenche des toxicités manganiques. Or, si le phosphate monocalcique est le principe actif des super-phosphates, il faut toutefois faire une différence entre les divers types de superphosphates : les superphosphates normaux, appelés aussi simples, contiennent en plus du phosphate monocalcique (15 à 24 % de P_2O_5) une certaine quantité de sulfate de calcium, de telle sorte que le rapport molaire global Ca/P sera relativement élevé (en fait il est voisin de 2 pour les formes les plus usuelles à 18-24 % de P_2O_5); les superphosphates enrichis (25 à 34 % de P_2O_5) contiennent un peu moins de gypse que les précédents, mais le rapport molaire Ca/P reste voisin de 1,2. Par contre, le superphosphate concentré — ou triple — à 45 % de P_2O_5 contient du phosphate monocalcique avec fort peu d'impuretés calciques, d'où un rapport molaire Ca/P voisin de 0,6. C'est donc avec ce dernier que l'on peut craindre des accidents manganiques.

Il est facile de faire les mêmes déductions pour les autres types de phosphates :

- phosphate tricalcique (Rock phosphate) :
Ca/P ≥ 3 aucun risque
- phosphate bicalcique (36 à 40 % de P_2O_5) :
Ca/P légèrement supérieur à 1 : risque faible

(1) Ces auteurs apportent une contribution importante à la connaissance de la dynamique du manganèse dans le sol : on a l'habitude de considérer le manganèse assimilable comme la somme du manganèse échangeable et du manganèse facilement réductible ; or un apport de Ca ou de P ne modifie en rien le manganèse dit assimilable (qui reste constant) ; seul le manganèse échangeable diminue ou augmente (aux dépens du Mn facilement réductible). Et pourtant, l'assimilabilité (constatée sur les plantes) du manganèse varie fortement selon qu'il y a apport de phosphore ... ou de calcium.

— scories de déphosphoration :

Bien que leur composition soit assez variable le rapport molaire Ca/P est généralement de l'ordre de 3 à 4. Risque nul

— phosphate d'alumine (34 % de P_2O_5 , 36 % de Al_2O_3 , 11 % de CaO) :

Ca/P de l'ordre de 0,4 : risque important.

Si on cherche à pousser jusqu'au bout le raisonnement de LE MARE en l'appliquant au phosphate d'ammonium (ce que cet auteur n'a pas fait), cet engrais pourrait être lui aussi responsable de certaines synergies phosphore-manganèse en sol acide. De fait, on a constaté que le chaulage empêchait toute toxicité induite par cet engrais.

DISCUSSION ET CONCLUSION — MÉCANISMES D'APPARITION DES TOXICITÉS INDUITES PAR LES ENGRAIS PHOSPHORÉES

INTOXICATION PROVOQUÉE PAR L'AMMONIAC ET L'AMMONIUM

Le phosphate d'ammonium (mono- ou bi-ammonique) est un engrais assez délicat à employer, en particulier s'il est localisé sur semis et jeunes plants, qu'il s'agisse de maïs (ROUTCHENKO et DELMAS, 1963), de blé (ESMINGER *et al.*, 1965) ou de cotonnier (ADAMS, 1966; ESMINGER, *op. cit.*). Lorsque l'on cherche les causes de ces intoxications, on incrimine soit l'action toxique de l'ammoniac gazeux, soit une absorption exagérée d'ammonium.

En ce qui concerne l'azote ammoniacal (NH_3 ou NH_4OH), il est bien connu qu'il est toxique pour toutes les cellules animales et végétales, même à faible dose. Toutefois, on sait (MÉGIE, 1966; MÉGIE, PEARSON, HILTBOLD, 1967) que ces toxicités ne se produisent pratiquement jamais à des pH inférieurs à 8. Or les sols dans lesquels on constate des toxicités induites par le phosphate d'ammonium sont des sols acides ou très acides. Malgré tout, cette hypothèse n'est pas à rejeter en bloc, car un dégagement d'ammoniac, qu'il provienne de l'engrais ou de la décomposition des résidus végétaux (MÉGIE *et al.*, *op. cit.*) est capable de provoquer des élévations locales de pH capables d'atteindre 8. Plus souvent, on invoque une absorption exagérée d'ions ammonium à la suite d'apports de phosphate biammonique (ROUTCHENKO et DELMAS, 1963; ADAMS, 1966; JUSTE, *com. pers.*) qui détruiraient l'équilibre cationique du milieu cellulaire. Il est vrai que les plantes ainsi intoxiquées sont riches en ammonium, mais on sait aussi que ce cation est peu nocif et que le plus souvent les membranes contrôlent assez

bien son entrée dans le cytoplasme de chaque cellule. Cela ne veut pas dire que la plante peut absorber n'importe quelle dose d'ammonium en restant indemne, mais qu'il vaut mieux faire preuve de prudence avant de conclure à une intoxication par le cation NH_4 .

Notons aussi que ces toxicités ammoniacales ne se produisent pratiquement jamais sur le maïs des Landes lorsqu'on relève par chaulage la réaction du sol jusque vers pH 6,0 (JUSTE, *com. pers.*). Dans l'Alabama, pour éviter la fonte des semis de cotonnier après apport de phosphate d'ammoniac, on conseille d'apporter du sulfate de calcium afin de mettre à profit un antagonisme supposé $Ca-NH_4$ (ADAMS, 1966).

ACIDIFICATION DU SOL ET ASSIMILABILITÉ DU MANGANÈSE

On a vu que le phosphate d'ammonium n'est pas seul à avoir le privilège d'induire des toxicités; il le partage avec le superphosphate concentré (ou triple). Or ces toxicités apparaissent bien souvent dues à une absorption excessive de manganèse après hydrolyse du phosphate monocalcique engendrant une acidité importante. Quant au phosphate ammoniacal, son ammonium se transforme rapidement (quelques jours en climat chaud et humide) en ions nitrates NO_3^- ; cet engrais se comporte donc comme s'il fournissait au sol uniquement des anions (PO_4^{--} et NO_3^-) : il a donc un pouvoir acidificateur considérable. Lorsque l'on a vu plus haut qu'un apport de ces phosphates favorisait l'assimilation du manganèse — au point, parfois, de le rendre toxique — on peut légitimement se demander si l'acidification du sol ainsi provoquée n'est pas suffisante pour expliquer ce phénomène. En effet, le manganèse à pH alcalin ou neutre est surtout tétravalent ou trivalent (MnO_2 et Mn_2O_3) sous des formes peu assimilables; dès que le pH s'abaisse, il tend à devenir divalent (MnO) et possède alors une forte assimilabilité.

LA SYNERGIE PHOSPHORE-MANGANÈSE

On a vu précédemment que de nombreux agromonomes avaient été frappés par les relations qui existent entre phosphore et manganèse.

Il semble bien que l'abaissement du pH du sol par le superphosphate triple ou le phosphate d'ammoniac soit incapable à lui seul d'expliquer l'accroissement de l'assimilation du manganèse par les cultures. En effet, dans les expériences de LE MARE (1978 a) le sol est loin d'être fortement acide (pH $CaCl_2$ 5,5 donc pH H_2O proche de 6,3); il se trouve en tout cas nettement au-dessus de pH H_2O 5,5 bien souvent indiqué comme limite

supérieure des accidents manganiques purs en sol sain. Et pourtant, les cotonniers meurent par absorption excessive de manganèse uniquement après apport de superphosphate triple.

D'autre part TRUONG, WILSON et ANDREW (1971) invoquent des interactions entre phosphore, manganèse et calcium en solution nutritive, notion que LE MARE (1978 c) n'hésite pas à appliquer au sol.

A l'appui de cette notion, encore discutée, de synergie entre le phosphore et le manganèse, on doit citer l'opinion de CHENERY (1955). Ce grand précurseur avait constaté qu'une forte teneur du sol en manganèse stimulait l'alimentation phosphorique du théier. Il en concluait à l'existence d'une interaction positive P-Mn.

En définitive, même si les phénomènes que recouvre l'action dépressive de certains engrais

phosphatés sont complexes, il semble, lorsque l'on constate de tels effets, qu'il ne faille jamais oublier que phosphore de l'engrais et manganèse sont synergiques et que l'on peut briser cette synergie en utilisant l'antagonisme calcium-manganèse.

Une solution élégante consistera à apporter *en sol acide* des engrais phosphatés comportant plus d'atomes de calcium que de phosphore (phosphate tricalcique, superphosphate simple) ou le même nombre d'atomes de phosphore et de calcium (superphosphate enrichi et phosphate bicalcique). On utilisera avec précaution, par crainte d'accident manganique, superphosphate triple, phosphate diammonique et phosphate d'alumine, ou bien on neutralisera par un chaulage préalable d'éventuels effets nocifs du manganèse dus à ces engrais.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS (F.), 1966. — Calcium deficiency as a causal agent of ammonium phosphate injury to cotton seedlings. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 4 : 485-488.
- BORTNER (C. E.), 1935. — Toxicity of manganese to Turkish tobacco in acid Kentucky soils. *Soil. Sci.*, 39 : 15-33.
- BOULDIN (D. R.), LEHR (J. R.), SAMPNE (E. C.), 1960. — The effect of associated salts on transformations of monocalcium phosphate monohydrate at the site of application. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 6 : 464-468.
- BOUYER (S.), 1967. — Compte rendu des débats du groupe II-I. In : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 nov. 1967, I, p. 461.
- BROWN (W. E.), LEHR (J. R.), 1959. — Application of phase rule to the chemical behavior of monocalcium phosphate monohydrate in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, 1 : 7-12.
- CHANG (S. C.) et CHU (W. K.), 1961. — The fate of soluble phosphate applied to soils. *Journal of Soil Science*, Oxford vol. 12, n° 2, sept. 1961 : 286-293.
- CHENERY (E. M.), 1955. — Preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant and Soil*, 1965, 6, 2 : 174-200.
- CHENG (B. T.), OUELLETTE (G. J.), 1968. — Effects of various anions on manganese toxicity in *Solanum tuberosum*. *Can. J. Soil Sci.*, 1968, 48, 2 : 109-115.
- COELHO (F. S.), VERLENGIA (F.), . — Fertilidade do solo. Edit. Instituto Campineiro de ensino Agrícola Campinas S. P. Brasil, 384 p.
- CONROY (E.), LAMBE (J. G. D.), 1962. — A phosphorus-magnesium interaction in tomato nutrition. *Nature*, 194, 500.
- DABIN (B.), 1963. — Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 1963, 3 : 27-42.
- ENSMINGER (L. E.), HOOD (J. T.), WILLIS (G. H.), 1965. — The mechanism of ammonium phosphate injury to seeds. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29, 3 : 320-322.
- HASEMAN (J. F.), BROWN (E. H.), WHITT (C. D.), 1950. — Some reactions of phosphate with clay and hydrous oxides of iron and aluminium. *Soil Sci.*, 70 : 257-271.
- JUSTE (C.), 1970. — Actions toxiques des oligo-éléments. *Ann. Agron.*, 25, 5 : 549-571.
- KELLEY (H. D.), 1912. — The function and distribution of manganese in plants and soils. *Hawaiian Agr. Exp. Stat. Bull.*, n° 25.
- KELLOG (C. H.), ORVEVAL (A. C.), 1969. — Potentially arable soils of the world and critical measures for their use. *Adv. Agron.*, 21 : 109-170.

- LARSEN (S.), 1964. — The effect of phosphate application on manganese content of plants grown on neutral and alkaline soils. *Plant and Soil* XXI, 1 : 37-42.
- LEAVER (J. P.), RUSSELL (E. W.), 1957. — The reaction between phosphate and phosphate fixing soils. *J. Soil Sci.*, 8 : 113-126.
- LEHR (J. R.), BROWN (W. E.), 1958. — Calcium phosphate fertilizers. II : A petrographic study of their alteration in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 22, 1 : 29-32.
- LE MARE (P. H.), 1968. — Experiments of the effect of phosphate applied to a Buganda soil. II : Field experiments on the response curve to Triple superphosphate. *J. Agric. Sci.*, 70 : 271-279.
- LE MARE (P. H.), 1975. — A method for separating the hydrolysis products of monocalcium phosphate to test their effects on soils and crops. *J. Sci. Fd. Agric.*, 26, 5 : 675-679.
- LE MARE (P. H.), 1977 a. — Experiments on effect of phosphorus on the manganese nutrition of plants. I : Effects of monocalcium phosphate on manganese in ryegrass grown in two Buganda soils. *Plant and Soil*, 47, 3 : 593-605.
- LE MARE (P. H.), 1977 b. — Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. II : Interactions of phosphorus, calcium and manganese in cotton grown with nutrient solution. *Plant and Soil*, 47, 3 : 607-620.
- LE MARE (P. H.), 1977 c. — Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. III : The effect of calcium-phosphorus ratio on manganese in cotton grown in Buganda soil. *Plant and Soil* 42, 3 : 621-630.
- LINDSAY (W. R.), LEHR (J. R.), STEPHENSON (H. F.), 1959. — Nature of reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils. III : Studies with metastable triple point solution. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, 5 : 342-344.
- LINDSAY (W. L.), STEPHENSON (H. F.), 1959. — Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils. I : The solution that reacts with the soil. II : Dissolution and precipitation reactions involving iron, aluminium and manganese. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23, 1 : 12-22.
- MEGIE (C.), 1966. — Rôle du pH dans l'effet toxique de l'azote ammoniacal sur le cotonnier. *Col. Fibr. Trop.*, 21, 2 : 204-208.
- MEGIE (C.), PEARSON (R. W.), HILTBOLD (A. E.), 1967. — Toxicity of decomposing crop residues to cotton germination and seedling growth. *Agronomy Journal*, 59, March-April : 197-199.
- ROBERTSON (W. K.), NELLER (J. K.), BARTLEJJ (F. D.), 1954. — Effect of lime on the availability of phosphorus in soils of high and low sesquioxide content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18 : 184-187.
- ROSSITER (R. C.), 1951. — Phosphorus toxicity in subterranean clover and oats grown on Muchea sand and the modifying effects of lime and nitrate-nitrogen. *Australian J. Agric. Res.*, 3 : 227-243.
- ROSSITER (R. C.), 1955. — The influence of soil on phosphorus toxicity in subterranean clover (*Trifolium subterraneum*). *Australian J. Agric. Res.*, 6 : 1-8.
- ROUCHENKO (W.), DELMAS (J.), 1963. — Étude de l'action des apports localisés d'engrais sur maïs. *C.R. Acad. Agric. France*, 49 : 131-138.
- STEPHENS (D.), 1966. — Two experiments on the effects of heavy application of triple superphosphate on maize and cotton in Buganda clay loam soil. *East Afr. Agric. and For J.*, 1966, 31, 3 : 283-290.
- TERMAN (G. L.), 1960. — Yield response in experiments with phosphorus in relation to. I : Meaningful differences among sources on acid soils in the South-eastern states. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 5 : 356-360.
- TERMAN (G. L.), BOULDIN (D. R.), LEHR (J. R.), 1958. — Calcium phosphate fertilizers. I : Availability to plants and solubility in soils varying in pH. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 22, 1 : 25-29.
- TRONG (N. V.), ANDREW (C. S.), WILSON (G. L.), 1971. — Manganese toxicity in pasture legumes. II : Effects of pH and molybdenum levels in the substrate. *Plant and Soil*, 34 : 547-560.
- WALKER (T. W.), ADAMS (A. F. R.), ORCHISTON (H. D.), 1955. — Effect and interactions of molybdenum, calcium and phosphorus on yields and composition of *Tr. repens*, grown on acid molybdenum responsive soils. *Plant and Soil*, 6, 2 : 201-220.
- WALSH (T.), GOLDEN (J. D.), FLEMING (G. A.), 1950. — Soil and plant studies on manganese toxicity in swedes in relation to applied phosphates. *Trans. Fourth Intern. Cong. Soil Sci.*, 3 : 115-119.
- WARREN (R. G.), BENZIAN (B.), 1959. — High levels of phosphorus and die-back in yellow lupins. *Nature* (London), 184 : 1588.

Les oxydisols dans quelques milieux insulaires du Pacifique sud : caractérisation, conditions de formation, fertilité, classification (1)

Marc LATHAM

Pédologue O.R.S.T.O.M. Centre de Nouméa, B.P. 45, Nouméa Cedex (Nouvelle-Calédonie)

RÉSUMÉ

Les oxydisols sont des sols dépourvus de phyllites argileuses et constitués de sesquioxydes métalliques. Ils sont caractérisés par une très faible capacité d'échange de la matière minérale qui est dépendante du pH du sol, et ont été classés dans la « Soil taxonomy » en Acrhumox, Acrorllox et Acrustox. Ces sols peu courants par ailleurs sont assez bien représentés dans le Sud Pacifique.

Trois cas sont décrits :

- les ferriles constituées principalement de sesquioxydes de fer, sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie et aux îles Salomon ;*
- les allites peu profondes associées à des calcaires, formées de sesquioxydes d'aluminium et de fer, de réaction neutre à faiblement acide que l'on rencontre sur les atolls surélevés des Loyauté et du Sud Est des Fidji en particulier ;*
- les allites profondes sur roches volcaniques, de constitution analogue aux précédentes, mais beaucoup plus acides, que l'on a observées dans les îles orientales des Fidji et à Tahiti.*

Les conditions de formation de ces sols sont :

- une roche mère dépourvue de quartz ;*
- un climat tropical humide ayant agi pendant un temps plus ou moins long et qui a permis une intense désilicification des profils ;*
- des conditions géomorphologiques stables qui ont facilité le développement des profils.*

Cette forte évolution des constituants minéraux, la très faible capacité d'échange de la matière minérale et la rétrogradation du phosphore dans des complexes métalliques peu assimilables donnent à ces sols une fertilité naturelle médiocre. Lorsqu'ils sont couverts de forêt, la matière organique compense en partie ces défauts en permettant une meilleure fixation des ions tout en favorisant les qualités physiques et en particulier la structure. Mais des défrichements mal conduits ou des brûlis répétés les dégradent rapidement.

Ces sols ont toutefois entre eux des caractères de fertilité naturelle très différenciés :

- l'abondance de métaux lourds (Ni, Cr, Co) et la grande pauvreté des ferriles en éléments nutritifs majeurs (P_2O_5 , K_2O et CaO) rend leur mise en culture très problématique ;*

(1) Communication présentée à la conférence sur les sols à charges variables de Palmerston North (11-18 février 1981).

— la faible épaisseur des allites sur calcaire limite leur possibilité d'utilisation et rend ces sols très fragiles ;
 — enfin l'acidité des allites profondes sur roches volcaniques risque de provoquer des toxicités aluminiques et des fixations irréversibles de phosphore.

Ces sols qui ont été mal définis dans la plupart des classifications forment des unités pédoédaphiques naturelles.

Ils mériteraient des études plus poussées et une place plus précise dans les classifications et en particulier dans la Soil taxonomy qui n'envisage que les ferrites.

ABSTRACT

Oxidisols are soils composed of metallic sesquioxides which lack argillaceous phyllites. They are characterized by a very low cation exchange capacity which is connected with the pH of the soil, and have been classified in Soil Taxonomy as Acrhumox, Acrorthox and Acrustox. Although these soils are generally uncommon they are quite well represented in the South Pacific.

Three types will be described :

— *ferrites composed chiefly of iron sesquioxides formed on ultrabasic rocks in New Caledonia and in the Solomon Islands ;*

— *shallow allites on limestone composed of aluminium and iron sesquioxides, neutral to slightly acid, found in particular on raised atolls in the Loyalty Islands and in South East Fiji ;*

— *deep allites on volcanic rocks similar in composition to the preceding type, but much more acid, found in the eastern islands of Fiji and in Tahiti.*

The conditions for the formation of these soils are :

— *a base rock without quartz ;*

— *a wet tropical climate which has existed for long enough to severely desilicify profiles ;*

— *stable geomorphological conditions which facilitate the development of profiles.*

The highly evolved mineral constituents, the low cation exchange capacity, and the binding of phosphorous into metal complexes which cannot be easily assimilated, give these soils a natural low fertility. When they are covered with the natural forest, organic matter improves their physical characteristics, especially their structure, and allows better cation fixation. But they deteriorate rapidly when the vegetation is subjected to badly managed clearings or repeated fires.

At the same time these soils can be distinguished from each other by their different types of fertility :

— *the high levels of heavy metals (Ni, Cr, Co) and the lack of principal mineral nutrients (P_2O_5 , K_2O and CaO) in the ferrites make them very difficult to cultivate ;*

— *the shallowness of the allites on limestone restricts their usefulness and makes them very fragile ;*

— *the acidity of the deep allites on volcanic rocks can lead to aluminium poisoning and irreversible phosphorous fixation.*

These soils, which have been badly defined in most classifications form a natural pedo-edaphic group. They are worth a more serious study and a more detailed classification in particular in Soil Taxonomy which at present recognizes only ferrites.

Les oxydisols, constitués de sesquioxydes métalliques, sont pratiquement dépourvus de phyllites argileuses. Ces sols sont fréquents dans les îles du Pacifique Sud et méritent une attention particulière de la part des pédologues. Ils sont très diversifiés et, de ce fait, cet exposé sera limité à trois catégories que nous avons plus particulièrement étudiées :

— les sols ferritiques sur roches ultrabasiques, qui sont constitués essentiellement de sesquioxydes de fer ;

— les sols allitiques peu profonds, associés à un substrat calcaire, dont la fraction minérale est formée de sesquioxydes d'aluminium et de fer, la fraction aluminium l'emportant sur la fraction

TABLEAU 1
Sols ferritiques, caractéristiques chimiques

N° de l'échantillon	BOU 121	BOU 122	BOU 123	BOU 124	BOU 125
Profondeur en cm.....	0-10	30-40	50-60	90-100	240-250
Matière organique %	2,6	0,64	—	—	—
pH eau.....	5,6	5,5	5,0	5,1	4,8
pH Kcl.....	4,8	5,3	5,8	5,9	5,9
<i>Complexe d'échange en mé/100 g</i>					
Ca ⁺⁺	0,16	0,02	0,01	0,01	0,01
Mg ⁺⁺	0,16	0,02	0,01	0,43	0,32
K ⁺	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Na ⁺	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Al ⁺⁺⁺	tr	tr	tr	—	—
Capacité d'échange pH 7...	6,94	3,09	0,33	0,01	0,01
Capacité d'échange pH 8,2...	—	4,2	5,4	5,5	5,3
<i>Éléments totaux %</i>					
Perte au feu.....	10,1	10,4	12,5	13,4	14,3
Résidu.....	0,41	0,64	0,34	0,18	0,10
SiO ₂	0,58	0,47	1,18	1,67	1,73
Al ₂ O ₃	3,94	4,83	4,43	3,00	2,58
Fe ₂ O ₃	76,7	73,3	75,1	76,7	76,5
TiO ₂	0,23	0,20	0,16	0,06	0,06
MnO ₂	0,19	0,23	0,45	0,44	0,57
NiO.....	0,12	0,08	0,55	1,23	1,16
Cr ₂ O ₃	6,77	8,31	5,35	3,61	3,17
CoO.....	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,25	0,16	0,45	0,94	1,13
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06

ferrugineuse. Ces sols ont un pH neutre à faiblement acide qui est en relation avec la proximité du substrat calcaire;

— les sols allitiques profonds sur roches volcaniques dont la composition est voisine de celle des précédents mais qui sont franchement acides.

Seront successivement abordées les principales caractéristiques de ces sols, leurs conditions de formation, leur fertilité et leur classification.

1. Principales caractéristiques

LES SOLS FERRITIQUES

Les sols ferritiques qui recouvrent en Nouvelle-Calédonie les principaux affleurements de roches ultrabasiques occupent près de 20 % de la surface du territoire. Ils se développent sous des pluviosités moyennes annuelles allant de 1 200 mm à plus de 3 000 mm dans un relief formé de surfaces d'aplanissement et de pentes très fortes. Des sols de ce type

ont été observés aux îles Salomon (LEE, 1969) et en Papouasie Nouvelle-Guinée (LOEFLE, 1978).

Ce sont généralement des sols profonds : certains profils pédologiques peuvent atteindre près de 100 m de profondeur sur le massif de la Tiebaghi dans le Nord de la Nouvelle-Calédonie. Mais ils sont le plus souvent tronqués par érosion sur les pentes fortes qui bordent les surfaces anciennes d'aplanissement. Dans leur profil on distingue :

— un horizon humifère, de couleur brun-rouge foncé, de texture sablo-limoneuse, riche en concrétions ou graviers ferrugineux;

— un horizon B, de 50 cm à plusieurs mètres d'épaisseur, de couleur brune (7,5 YR 4/4) à rouge sombre (10 R 3/4), de texture limoneuse. Dans certains profils, on peut noter une induration en cuirasses ainsi que des débris ferrugineux indurés de taille variable;

— un horizon BC, de un à plusieurs mètres d'épaisseur, à structure de la roche conservée, de couleur brun-rouge (5 YR 4/4) à jaune-rouge

TABLEAU 2

Sols allitiques sur calcaire, caractéristiques chimiques

N° de l'échantillon	Li 101	Li 102	MA 11	MA 12
Profondeur en cm.....	0-10	40-50	0-10	30-40
Matière organique %.....	9,2	3,1	16,4	5,5
pH eau.....	6,6	5,5	7,5	5,9
pH Kcl.....	6,1	5,6	7,1	5,8
<i>Complexe d'échange en mé/100 g</i>				
Ca ⁺⁺	20,3	1,43	65,6	6,5
Mg ⁺⁺	3,69	0,60	19,8	3,4
K ⁺	0,62	0,06	0,29	0,04
Na ⁺	0,09	0,01	0,37	0,21
Al ⁺⁺⁺	tr	tr	tr	tr
Capacité d'échange pH 7.....	30,2	14,3	57,9	21
Capacité d'échange pH 8,2.....	—	—	89,1	34,3
<i>Éléments totaux %</i>				
Perte au feu.....	24,4	19,5	34,7	28,9
Résidu.....	1,07	1,32	0,60	0,98
SiO ₂	0,62	0,71	0,73	0,90
Al ₂ O ₃	45,6	47,5	34,8	43,7
Fe ₂ O ₃	25,3	26,7	20,0	23,6
TiO ₂	—	—	—	—
MnO ₂	0,64	0,65	0,70	0,66
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,02	0,02	0,03	0,03
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02

(5 YR 4/6), de densité apparente très faible et présentant parfois une induration lamellaire le long d'anciens plans diaclasses de la roche. Au microscope sont observés des fantômes de périclites et de pyroxènes entièrement ferruginisés;

— la transition vers la roche saine se fait par l'intermédiaire d'un horizon C riche en minéraux peu altérés dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à plusieurs mètres.

Ces sols sont acides (pH < 6); leur teneur en bases échangeables et leur capacité d'échange sont très faibles et liées à leur richesse en matière organique. Dans les horizons B, capacité d'échange et bases échangeables sont difficiles à mesurer vu leur faible valeur. Cela est d'autant plus valable pour la détermination de la capacité d'échange au CaCl₂ tamponné qui peut être faussée par les risques de fixation des ions chlorures sur les hydroxydes. L'analyse totale révèle des teneurs en silice inférieures à 1 %, et en hydroxydes et oxydes de fer de 60 à 80 %, d'alumine et de chrome de 5 à 10 %. Ces sols sont essentiellement constitués de goethite et d'hématite, ces goethites pouvant être alumineuses.

Ces sols se présentent donc comme des sols ferrallitiques, dépourvus de kaolinite et à constitution essentiellement ferrugineuse.

LES SOLS ALLITIQUES ASSOCIÉS À UN SUBSTRAT CALCAIRE

Les sols allitiques associés à un substrat calcaire ont été observés sur les atolls surélevés des îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie) et de Kabara (île du Sud-Est des Lau aux Fidji). Ils sont localisés sur d'anciens fonds de lagon, aujourd'hui exondés et sous des pluviosités actuelles de 1 300 à 2 000 mm/an. L'origine volcanique allochtone, ponce et cendres flottées de leur matériau originel a été mise en évidence par TERCINIER (1971).

Ces sols sont constitués de matériaux rougeâtres de 40 à 80 cm d'épaisseur, reposant sans transition sur un substrat calcaire. Là où la forêt dense naturelle a été conservée, on observe un horizon humifère d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, de couleur brun-rouge foncé (5 YR 3/3), à texture limono-argileuse et structure grumeleuse très nette.

TABLEAU 3

Sols allitiques sur andésite, caractéristiques chimiques

N° de l'échantillon	LK 121	LK 122	LK 123	LK 124	LK 126
Profondeur en cm.....	0-10	30-40	60-70	100-110	180-190
Matière organique %.....	4,7	0,52	—	—	—
pH eau.....	5,0	4,7	4,9	4,2	4,6
pH Kcl.....	5,0	5,3	5,6	5,7	5,9
<i>Complexe d'échange en mé/100 g</i>					
Ca ⁺⁺	2,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Mg ⁺⁺	2,3	0,1	0,1	0,1	0,1
K.....	0,3	0,07	0,02	0,01	0,02
Na ⁺	0,2	0,05	0,05	0,03	0,04
Al ⁺⁺⁺	tr	tr	—	—	—
Capacité d'échange pH 7....	30,7	10,2	2,7	0,01	0,01
Capacité d'échange pH 8,2..	41,5	10,1	9,0	3,3	3,5
<i>Éléments totaux %</i>					
Perte au feu.....	32,0	25,6	25,8	24,6	22,0
Résidu.....	2,6	3,0	4,2	2,9	2,4
SiO ₂	6,5	0,5	0,5	0,6	4,0
Al ₂ O ₃	38,0	48,5	48,5	47,5	40,9
Fe ₂ O ₃	16,5	18,5	18,0	24,0	27,3
TiO ₂	1,7	2,1	1,9	2,5	2,6
MnO.....	3,5	3,5	4,0	0,33	0,22
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,31	0,02	0,03	0,02	0,15
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01

Mais lorsque des défrichements prolongés se sont produits, la structure devient massive, peu cohérente, et la couleur du sol devient plus claire (7,5 YR 4/4). Sous l'horizon humifère se développe un horizon B, brun à brun-rouge (7,5 YR 4/4), limono-argileux à structure massive mais peu cohérente.

Les sols sont très riches en matière organique (souvent plus de 10 %) et ont une réaction neutre à faiblement acide. Leur capacité d'échange et leur teneur en bases échangeables sont très élevées dans l'horizon humifère du fait de la matière organique mais elles baissent rapidement en profondeur. L'analyse totale révèle de très faibles teneurs en silice (< 1 %) et une prédominance de l'aluminium sur le fer au niveau des oxydes métalliques (40 à 50 % d'Al₂O₃ et 20 à 25 % de Fe₂O₃). La diffractométrie aux rayons X indique une composition à base de boehmite, de gibbsite et de goéthite plus ou moins bien cristallisées (TERCINIER, 1971).

Ces sols allitiques, considérés comme des bauxites de karst bien connues des géologues MILLOT (1964), ont été observés sur les principaux atolls surélevés de la région, Rennel (WEISSE, 1970), Niue (WRIGHT

et VAN WESTERNDORP, 1965) ainsi que dans les Caraïbes, Jamaïque (ZANS, LEMOINE, ROCHE, 1961, AHMAD *et al.*, 1966).

LES SOLS ALLITIQUES SUR ROCHES VOLCANIQUES

Des sols allitiques profonds ont été décrits à Lakeba, aux îles Fidji, sur un substrat andésitique. On en note aussi à Taveuni, Fidji (DENIS, 1978), à Tahiti (TERCINIER, 1974) et à Santo, Vanuatu (QUANTIN, 1976). Ils se forment dans les régions à pluviosités élevées, 2 000 à plus de 3 000 mm/an, sur des replats ou dans des paysages faiblement accidentés.

Les sols de Lakeba ont été décrits sur des plateaux, témoins d'une morphologie ancienne (LATHAM, 1979). Ils sont profonds, souvent plus de 3 m, et présentent la succession suivante d'horizons :

— un horizon humifère brun-rouge sombre (5 YR 3/2) très faible, riche en concrétions ferromanganésifères, associées parfois à de petits éléments de meulière, à texture limoneuse et à structure polyédrique fine peu développée;

— un horizon B, rouge (2,5 YR 4/6), de texture limono-argileuse, à structure polyédrique moyenne nette, de densité apparente faible (inférieure à 1) liée à une forte microporosité et riche en concrétions ferromanganésifères;

— un horizon B C de texture argileuse, à structure polyédrique moyenne.

Ce sont des sols acides, très désaturés en bases échangeables hormis dans les horizons humifères. La capacité d'échange cationique de leurs horizons minéraux est très faible et difficilement mesurable au chlorure de calcium à pH 7. Leur composition totale est alumineuse et à un moindre degré ferrugineuse. Ils sont pratiquement dépourvus de silice. Les analyses diffractométriques aux rayons X indiquent une prédominance de la gibbsite, associée à un peu de boehmite. On note aussi des quantités importantes d'hématite et un peu de goethite. L'analyse n'a pas révélé de minéraux argileux à l'exception d'un peu de métahalloysite dans l'horizon B.C.

Ces sols sont dénommés classiquement « bauxites latéritiques ».

ANALOGIES ENTRE CES SOLS

Ces sols, différents par certaines de leurs caractéristiques morphologiques, physico-chimiques et minéralogiques, forment une entité au sein des sols ferrallitiques ou des « oxisols ». Ils ont en commun :

— une absence de silice et de minéraux argileux dans leurs horizons A et B et une composition à base de sesquioxydes métalliques;

— une capacité d'échange cationique mesurée à pH 7 très faible dans les horizons minéraux. Cette détermination est toutefois souvent difficile à réaliser du fait des liaisons intimes qui peuvent exister entre la matière minérale et la matière organique. Cette capacité d'échange cationique augmente fortement lorsqu'on la mesure à pH 8,2, ce qui indique l'importance des charges variables dans ces sols;

— un pH KCl des horizons minéraux généralement supérieur au pH eau du fait de la présence de sesquioxydes de fer à fortes charges variables;

— une grande friabilité, une importante microporosité et une densité apparente très faible;

— une très faible agrégation des sols lorsqu'ils sont pauvres en matière organique, donnant des structures massives peu cohérentes.

2. Conditions de formation

La genèse de ces sols passe par une désilicification complète des altérites due à :

— l'absence de quartz dans la roche mère;

— au climat chaud et humide et à l'intensité des précipitations qui provoque une rapide et forte lixiviation du profil;

— des conditions géomorphologiques stables qui permettent le développement profond des profils.

L'absence de quartz empêche dans ces sols une réserve permanente en silice qui permettrait la cristallisation de kaolinite ordonnée. Seules des phases silicatées secondaires et fugaces (smectite, allophanes, métahalloysite) peuvent se présenter entre la roche mère et les horizons pédologiques.

— Dans les sols ferritiques sur roches ultrabasiques, l'altération peut se traduire soit par une ferruginisation directe des périclites et des pyroxènes dans les secteurs soumis à une très forte lixiviation, soit par un horizon intermédiaire riche en antigorite et en smectites ferrifères et magnésiennes dans les secteurs soumis à une plus faible pluviosité. Le passage de cet horizon profond à smectites aux horizons ferritiques est toujours brutal et se fait sans intermédiaire d'argile 1/1.

— Pour les sols allitiques des îles Loyauté, TERCINIER (1971) a pu mettre en évidence sur le pourtour de ces atolls des dépôts, de ponces en partie allitisées mais contenant encore des minéraux amorphes de type allophane. Ces allophanes seraient les intermédiaires entre le matériau pyroclastique et les allites.

— Enfin, sur les plateaux de Lakéba, l'intermédiaire entre le matériau allitique et la roche mère est une métahalloysite.

L'absence de kaolinite bien cristallisée dans ces sols est un signe de l'état transitoire fugace des silicates secondaires dû à l'absence d'alimentation continue en silice par l'intermédiaire du quartz.

Cette désilicification est favorisée dans les milieux étudiés par une pluviosité importante variant dans ces îles entre 1.500 et 3.000 mm/an. La lixiviation est facilitée par une position haute dans le paysage et par une forte porosité du milieu. Les périclites sont très diaclasées et leur évolution karstique a été reconnue (TRECASSES, 1975; LATHAM, 1977) : les calcaires des Loyauté sont pour leur part très perméables; enfin, les andésites des Fidji en s'altérant forment un matériau à forte microporosité. Certains des sols décrits se trouvent parfois dans des conditions climatiques limites; c'est le cas des sols ferritiques dans certains secteurs où il pleut moins de 1 200 mm/an et où actuellement l'évolution smectitique l'emporte sur la ferritisation. Mais ces sols sont souvent très anciens; certains sols ferritiques de Nouvelle-Calédonie seraient datés du Miocène inférieur. Ils représentent en fait le résultat d'une très

TABLEAU 4

Baisse de la fertilité des horizons A_1 des sols des îles Loyauté après défrichement et culture

	Forêt M. 4 éch.	Culture M. 2 éch.	Jachère M. 3 éch.	Savane M. 2 éch.
Structure *	G	P	G	P
Carbone %	11.1	6.6	6.8	7.6
Azote %	0.9	0.5	0.6	0.6
C/N	12.2	13.0	11.3	12.0
pH eau	7.4	7.1	6.7	6.8
Ca ⁺⁺ éch. en mé/100 g	62.8	21.9	19.6	21.0
Mg ⁺⁺ éch. en mé/100 g	12.0	5.9	8.2	12.7
K ⁺ éch. en mé/100 g	0.35	0.71	0.43	0.30
T en mé/100 g	60.1	37.3	39.7	43.3
S/T %	98.0	86.0	71.1	76.6
P ₂ O ₅ %	24.0	31.0	25.2	23.1

* G. Structure grumeleuse ; P. Structure particulaire.

longue pédogenèse qui a pu évoluer sous des climats plus humides. Cela est aussi valable pour les sols allitiques des îles Loyauté qui ont évolué sur place depuis l'émergence de ces atolls, ou pour les sols de Lakéba. L'importance et le temps durant lequel s'est effectuée la lixiviation sont donc des facteurs importants de cette désilicification.

Cette notion de temps d'évolution pédogénétique amène à envisager le problème de la stabilité du relief. Les sols ferritiques ou allitiques sont particulièrement bien développés dans les ensembles géomorphologiques stables : plateaux, épaulements, glacis surélevés. Ils sont ainsi protégés contre les effets de l'érosion et d'une troncature des profils qui amèneraient en surface des horizons d'altération contenant des silicates. Ils peuvent se former dans un relief plus accidenté, mais leur présence est liée à un climat actuel très humide comme c'est le cas à Taravao, à Tahiti (2.000 mm/an) et à Taveuni, aux îles Fidji, où, sur un matériau volcanique récent, il pleut plus que 3.500 mm/an dans les secteurs humides d'altitude sur péridotite en Nouvelle-Calédonie.

Les conditions de formation des sols ferritiques et allitiques sont donc assez similaires. C'est le stade d'évolution le plus poussé de sols formés dans des conditions tropicales humides en milieu drainé, sur des roches silicatées dépourvues de quartz.

3. Fertilité naturelle

Cette forte évolution des constituants minéraux donne à ces sols un potentiel de fertilité naturelle médiocre. Ils sont très peu cultivés, à l'exception des sols allitiques sur calcaire et, lorsqu'ils le sont, de

longues jachères sont pratiquées entre chaque culture. Pour sa part, la forêt dense naturelle est très sensible au feu sur les sols les plus profonds et lorsqu'elle a été détruite, cette forêt est bien souvent remplacée par une fougère ou par un maquis pauvre en graminées. Sa régénération naturelle est alors lente.

La fertilité de ces sols est intimement liée à la matière organique qui sert à la fois de réserve en éléments minéraux et de fixateur de ces éléments. Elle est donc très fragile. Il est symptomatique de voir aux îles Loyauté, après une mise en culture prolongée, une acidification des horizons superficiels, une baisse des teneurs en matières organiques et en bases échangeables et de la capacité d'échange ainsi qu'une dégradation de la structure (tabl. 4). Cela explique le système de jachère prolongée utilisé : 2 ans de culture pour 7 à 8 ans de jachère. Cette baisse de fertilité peut être accentuée sur pente par une érosion superficielle qui peut entraîner une quasi-stérilisation du sol comme cela a pu être observé sur sols ferritiques en Nouvelle-Calédonie. Dans ce cas, on a pu noter, dans des secteurs où la végétation a été soumise à de nombreux feux, une disparition complète de la végétation et même une légère induration superficielle dans les zones où les hydroxydes de fer peu cristallisés abondent.

Le phosphore de ces sols est lié à la matière organique et aux sesquioxides métalliques. Il est peu abondant sauf dans les zones qui ont reçu des apports de guano, lequel a pu favoriser la formation de phosphate de fer ou d'aluminium. Des teneurs de 2 à 5 % de P₂O₅ total, principalement sous forme de crandalite, un phosphate d'aluminium, ont été signalés aux îles Loyauté. Sur cuirasses ferritiques

aux îles Belep, dans le Nord de la Nouvelle-Calédonie, on a pu analyser jusqu'à 1 % de P_2O_5 total. Mais ce phosphore est loin d'être entièrement assimilable et, hormis quelques cas particuliers, la carence en phosphore est l'une des causes les plus régulièrement avancées de la faible fertilité de ces sols. Il a été constaté, par les forestiers de Nouvelle-Calédonie, que des apports d'engrais phosphatés dans des plantations de *Pinus caribaea* sur sol ferritique n'avaient qu'un effet réduit sur la croissance des arbres, du fait probable d'une rapide rétrogradation de cet élément sous forme de phosphate de fer.

Des carences en silice sont aussi à envisager pour certaines cultures exigeantes en cet élément, comme cela a été noté à Hawaï pour la canne à sucre (Fox *et al.*, 1967). Ainsi des maïs qui avaient des difficultés de croissance sur sol allitique aux îles Loyauté, avaient une composition chimique équilibrée à l'exception de teneurs très faibles en silice (moins de 1 % par rapport à la matière sèche, contre des teneurs de quelques pour cent dans le cas normal).

Avec ces causes générales de faible fertilité interviennent des aspects plus spécifiques :

— sur les sols ferritiques, les très faibles teneurs en éléments nutritifs majeurs (P_2O_5 , K_2O et CaO) sont très probablement la cause principale des difficultés rencontrées par les plantes courantes pour se développer dans ce milieu, mais l'abondance de métaux lourds, nickel, chrome et cobalt a aussi été envisagée comme un frein à la croissance des plantes non adaptées. Les toxicités dues au nickel, au chrome ou au cobalt ont été avancées pour expliquer l'originalité du maquis minier en Nouvelle-Calédonie (BIRREL et WRIGHT, 1945; JAFFRE, 1980). Mais, si l'effet toxique de ces éléments a pu être démontré en vases de végétation avec des apports de sels, il reste à préciser dans les conditions naturelles. C'est ainsi que les maraîchers de la région de Nouméa, faute d'autre terre à proximité de la ville, ont cultivé depuis une dizaine d'années, avec succès, des sols ferritiques; ils apportent des amendements calciques, du fumier et des engrais minéraux et réussissent très bien leurs légumes. Ces sols présentent, en effet, des caractéristiques physiques de friabilité et de drainage très recherchées pour ce type de culture.

— La faible épaisseur des sols allitiques sur substrat calcaire et une forte carence en potasse liée à un déséquilibre entre cet élément et les autres cations échangeables sont les principales limites d'utilisation de ces terres. Des blocages, du fait du pH, de certains oligo-éléments : zinc, manganèse et bore, ont aussi été signalés (TERCINIER, 1971; MANCIOT, 1979). Cela n'empêche pas la pratique de cultures vivrières traditionnelles avec de longues périodes de jachère. Après fertilisation potassique,

des cultures maraîchères ont été réalisées avec succès ces dernières années.

— Enfin, les sols allitiques profonds comme les sols ferritiques pourraient présenter d'éventuelles toxicités aluminiques et manganiques. La présence d'aluminium échangeable a été décelée sous forme de traces dans les horizons humifères de ces sols, mais, en présence de KCl, le pH de ces terres remonte, ce qui influe probablement sur la solubilité de l'aluminium.

Il apparaît ainsi, que ces sols présentent de très nombreuses contraintes pour leur mise en valeur, ce qui les a fait le plus souvent, considérer comme très peu fertiles. Ils possèdent cependant, des caractéristiques physiques très intéressantes et il est probable que, grâce à des amendements spécifiques, ils pourraient devenir des terres productives.

4. Problème de classification

Jusqu'à présent, ces sols n'ont pas reçu une place explicite dans les principales classifications.

Dans la classification française, ces sols doivent être inclus dans la classe des sols ferrallitiques, mais leur spécificité n'a pas véritablement été retenue. Les sous-classes sont définies d'après le taux de saturation du complexe d'échange dans l'horizon B (C.P.C.S. 1967). Or le taux de saturation n'a pas la même signification dans ces sols dépourvus de capacité d'échange cationique au niveau de la matière minérale.

Récemment, DUCHAUFOR (1977) a proposé la création de ferrallites dans la classe ferrallitique pour les sols à dominance de sesquioxides métalliques, au sein desquels il distingue des ferrites et des allites. Enfin, SEGALIN *et al.* (1979) dans leur « projet de classification des sols » proposent la création d'oxydisols pour des sols présentant plus de 60 % d'oxydes métalliques libres et moins de 10 % de kaolinite et de minéraux primaires altérables dans la fraction 20-200 μ .

Dans la « Soil Taxonomy » (1976), ils ont leur place dans les « oxisols » bien que, pour les sols allitiques sur calcaire, des questions de profondeur de l'horizon oxisse se posent parfois. Au sein des « oxisols », leur différenciation se fait non pas au niveau des sous-ordres mais au niveau des grands groupes. Ils devraient tous être inclus dans les grands groupes « Acr », aucune différenciation n'étant faite à ce niveau entre les trois catégories décrites, à l'exception des critères de teneur en humus ou de présence de cuirasse. Les sols allitiques ne peuvent pas, en effet, rentrer dans le groupe « gibbsi » car ils ne présentent pas de graviers gibbsitiques indurés. Mais les grands groupes « Acr » de la « Soil taxonomy »

sont principalement réservés aux sols ferritiques dérivés de roches ultrabasiques de Porto-Rico.

Récemment le groupe ICOMOX (1), dans sa circulaire n° 6/80, a proposé la création du sous-ordre des « akrox » avec la définition d'un « akric soil material » basée sur une capacité d'échange effective des cations inférieure à 1,5 mé/100 g d'argile et un delta pH entre pH KCl et pH eau supérieur à -0,2. Seraient exclus de cette définition les sols présentant une dominance de gibbsite sans sesquioxydes de fer.

Dans ces conditions, les sols présentés entreraient dans cette unité, la dominance de la gibbsite dans les sols allitiques étant toujours contre balancée par d'importantes quantités d'hydroxydes de fer. Il reste, toutefois, à séparer chacune des unités décrites ci-dessus, si possible à un niveau supérieur à celui de la famille.

Le problème des critères de classification de ces sols reste toutefois posé et deux écoles s'affrontent à ce sujet :

— l'école française qui retient la teneur en sesquioxydes métalliques libres;

— l'école américaine qui privilégie la capacité d'échange cationique de l'argile et les charges variables.

Dans la mesure toutefois où la capacité d'échange et les charges variables sont subordonnées à la teneur en sesquioxydes métalliques, il apparaîtrait plus logique de classer directement les sols d'après cette teneur.

Il ressort de cette discussion que la classification de ces oxydisols demeure encore imprécise et qu'elle demanderait à être examinée plus en détail

Conclusion

Les oxydisols forment un pôle extrême du processus de ferrallitisation. Ils sont variés, mais très différenciés au sein des sols ferrallitiques par rapport aux kaolisols. Ils sont caractérisés par :

— une composition à base de sesquioxydes métalliques sans silice et sans minéraux argileux;

— une capacité d'échange à pH 7 généralement inférieure à 1,5 mé/100 g d'argile et de fortes charges variables;

— une grande friabilité, une forte porosité et une densité apparente inférieure à 1 dans les horizons B.

Ils sont spécifiques d'une pédogenèse tropicale humide en milieu bien drainé sur des roches dépourvues de quartz, dans des conditions de forte pluviosité et dans un contexte géomorphologique stable. Leur fertilité naturelle est faible, et ils ont souvent été considérés comme des sols à ne pas utiliser au point de vue agronomique. Or il apparaît qu'avec des apports d'amendements et d'éléments fertilisants, du fait de leurs caractéristiques physiques favorables et pour des spéculations rentables, il serait possible de les cultiver de façon intensive.

Leurs conditions d'emploi demandent cependant à être précisées, de même que leur classification. Ainsi tant pour leur intérêt théorique qu'économique, ces sols devraient être pris en considération de façon plus approfondie.

Remerciements

L'auteur tient à remercier M. le professeur LENEUF et MM. DE BOISSEZON et SÉGALEN pour avoir relu ce texte et contribué par leurs remarques à l'améliorer.

(1) I.C.O.M.O.X. : International Committee on the Classification of Oxisols.

BIBLIOGRAPHIE

- AHMAD (N.), JONES (R. L.), BEAVERS (A. H.), 1966. — Genesis, mineralogy and related properties of West Indian soils : Bauxitic soil of Jamaica. *Soil Sci. Amer. Proc.*, vol. 30, n° 6 : 719-722.
- BIRREL (K. S.), WRIGHT (A. C. S.), 1945. — A serpentine soil in New Caledonia. *N. Z. J. Sci. Techn* 27 4 : 72-76.
- C.P.C.S., 1967. — Classification des sols. Lab. Pédologie-Géologie, E.N.S.A., Grignon, 87 p. *multigr.*
- DENIS (B.), 1978. — A descriptive note of the soils of Taveuni, in Taveuni : land, population and production U.N.E.S.C.O./U.N.F.P.A. Fiji Island report, n° 3. Canberra. A.N.U. for U.N.E.S.C.O. : 13-20.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1977. — Pedogenèse et classification. Masson ed., 477 p.
- FOX (R. L.), SILVA (J. A.), YOUNG (O. R.), PLUCKNET (D. L.), SCHERMAN (G. D.), 1967. — Soil and plant silicon and silicate response by sugar cane. *Soil Sci. Amer. Proc.*, vol. 31, n° 6 : 775-779.
- JAFFRÉ (T.), 1980. — Étude écologique du peuplement végétal des sols dérivés des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Thèse Science Paris Sud, 273 p.
- LATHAM (M.), 1975. — Les sols d'un massif de roches ultrabasiques de la Côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie : le Boulinda. Les sols à accumulation ferrugineuse relative. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 2 : 159-172.
- LATHAM (M.), 1977. — On geomorphology of northern and western New Caledonian ultramafic massifs. Symp. Inter. de Géodynamique du Sud-Ouest Pacifique. Ed. technip : 235-244.
- LATHAM (M.), 1979. — The natural environment of Lakeba. U.N.E.S.C.O./U.N.F.P.A. *Fiji Island report n° 5*, Canberra A.N.U. for U.N.E.S.C.O. : 13-64.
- LATHAM (M.), MERCKY (P.), 1980. — Étude des sols des îles Loyauté. O.R.S.T.O.M., Nouméa 37 : *multigr.* + annexes.
- LEE (K. E.), 1969. — Some soils of the British Solomon Islands protectorate. *Phil. Trans. Roy. Soc. B* 255 : 211-257.
- LOEFLE (E.), 1978. — Karst features of Igneous rocks in Papua New Guinea in Landform evolution in Australia. A.N.U. press : 238-249.
- MANCIOT (R.), 1979. — Étude technique et socio-économique de la cocoteraie calédonienne. Proposition d'intervention I.P.H.O., Paris, 70 p.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson & C^{ie}, 500 p.
- QUANTIN (P.), 1976. — Archipel des Nouvelles-Hébrides : sols et quelques données du milieu naturel. Santo. O.R.S.T.O.M., Paris, 37 p. + 2 cartes.
- SÉGALEN (P.), FAUCK (R.), LAMOUROUX (M.), PERRAUD (A.), QUANTIN (P.), ROEDERER (P.), VIELLEFON (J.), 1979. — Projet de classification des sols S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M., Bondy, 301 p.
- TERCINIER (G.), 1971. — Contribution à la connaissance des phénomènes de bauxitisation et d'allitisation. Les sols des karst d'atolls surélevés du Sud-Ouest Pacifique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3 : 307-334.
- TERCINIER (G.), 1974. — Cristalochimie des sols ferrallitiques totalement désilicifiés d'une région très humide de l'Océanie intertropicale. C.R. 10^e Congr. Inter. Sci. du sol, Moscou : 61-68.
- TRESCASES (J. J.), 1975. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale et la formation des gisements nickelifères en Nouvelle-Calédonie. Mémoire O.R.S.T.O.M., n° 78, 259 p.
- U.S.D.A. Soil Survey staff. 1976. — Soil Taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Handbook n° 436, 734 p.
- WEISSE (G. de), 1970. — Bauxite sur un atoll du Pacifique. L'île de Rennell dans l'archipel des Salomon. *Mineral deposits* 5-2 : 181-183.
- WRIGHT (A. C. S.), VAN WESTERDORF (F. J.), 1965. — Soils and agriculture of Niue Island. *N.Z. Dep. Sci. and Ind. resch. soil Bur. Bull.*, n° 17, 80 p.
- ZANS (V. A.), LEMOINE (R. G.), ROCHE (E.), 1961. — Genèse des bauxites des Caraïbes. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 252 : 3302-3304.

ANNEXE

Description des principaux profils

1. SOL FERRALLITIQUE FERRITIQUE EN ROCHE ULTRABASIQUE : BOU 12

- *Localisation* : Nouvelle Calédonie, Massif du Boulinda sous le Pic Poya.
- Paysage accidenté, replat entourant une dépression fermée.
- *Altitude* : 820 m.
- *Pluviométrie* : 2 000 mm/an.
- *Roche ultrabasique* : harzburgite.
- *Végétation* : lande avec quelques *Araucaria rulei*, en strale arborée, et de nombreuses fougères en strato herbacée.

En surface très nombreux blocs de cuirasse vacuolaire et bréchique, certains de grande taille (1 m de long).

0-20 cm A₁ :

— Frais, rouge sombre, 2,5 YR 3/2, à matière organique non directement décelable, très nombreux (9,5 %) éléments ferrugineux de forme nodulaire (scoriacés) de 1 à 5 cm de diamètre et blocs de cuirasse, sableux, structure particulière, volume des vides très important entre les éléments grossiers, meuble, quelques racines moyennes et fines.

Transition distincte et régulière.

20-40 cm, A₂ :

— Humide, rouge sombre, 2,5 YR 3/2, très nombreux (9,5 %) éléments ferrugineux de forme nodulaire (scoriacés), de petite taille, sableux, structure particulière, volume des vides très important entre les éléments grossiers, friable, quelques racines moyennes et fines.

Transition nette et régulière (à la limite entre ces deux horizons on observe une mince pellicule indurée).

40-70 cm, B₂ :

— Humide, brun rougeâtre foncé, 2,5 YR 3/4, quelques éléments ferrugineux de forme nodulaire de faible dimension et quelques galets ferrugineux de 3 à 4 cm de diamètre, limono-argileux, structure fragmentaire, polyédriques fine nette, parfois légère induration sur les éléments structuraux, volume des vides faible entre les agrégats, friable, quelques racines moyennes et fines.

Transition graduelle et régulière.

70-120 cm, B₃ :

— Humide, brun rougeâtre, 5 YR 4/4, limono-argileux avec quelques sables de chromite, structure fragmentaire, polyédrique fine nette, volume des vides faible entre les agrégats, friable, pas de racine.

Transition graduelle et régulière.

120-250 cm, B_{3C} :

— Humide, brun rougeâtre, 5 YR 5/4, quelques taches diffuses jaune-brunâtre, 10 YR 6/6, on reconnaît par endroits des plages de minéraux en voie d'altération (pyroxène, péridot), limono-argileux, structure fragmentaire polyédrique moyenne assez nette, volume des vides assez important entre les agrégats, microporosité importante, friable, pas de racines.

2. SOL FERRALLITIQUE ALLITIQUE HUMIFÈRE SUR CALCAIRE : LI 10

- *Localisation* : Nouvelle-Calédonie, Lifou, Hmeleck.
- *Climat* : tropical océanique : pluviométrie moyenne 1 468 mm/an.
- *Site* : fond de lagon surélevé.
- *Matériau originel* : matériau volcanique sur calcaire.
- *Végétation* : défriche à *Lantana camara*, *Psidium*, *Indigofera* sp. et Malvacées.

0-25 cm

Frais, 7,5 YR 4/4 brun, limono-argileux, pseudo-concrétions brunes, structure fragmentaire nette grumeleuse moyenne à fine, volume des vides important entre les agrégats, agrégats peu poreux, meuble, friable, nombreuses racines fines quelques moyennes, transition nette et irrégulière (semelle de labour).

25-40 cm à 80 cm

— Frais, 7,5 YR 4/4, brun, limono-argileux, structure massive à débit angulaire, quelques petites pseudo-concrétions brunes, volume des vides faible, microporosité importante, friable, quelques racines fines, transition très nette et ondulée.

3. SOL FERRALLITIQUE ALLITIQUE HUMIFÈRE SUR CALCAIRE : MA 1

— *Localisation* : Nouvelle-Calédonie, Maré, La Roche, Route de Rawa à 100 m du croisement.

— *Climat* : tropical océanique ; pluviométrie moyenne 1 513 mm/an.

— *Site* : ancien lagon surélevé.

— *Matériau originel* : matériau volcanique sur calcaire.

— *Végétation* : fourré à faux poivrier, *Dodonea viscosa*, *Lantana camara* et *Imperata cylindrica*.

0-15 cm

— Frais, brun foncé, 7,5 YR 3/2, limono-argileux, structure fragmentaire nette grumelleuse à polyédrique fine, volume des vides assez important entre les agrégats, microporosité importante, friable, meuble, nombreuses racines moyennes et fines, transition distincte et régulière.

15-40 cm

— Frais, 7,5 YR 4/4 brun, limono-argileux, structure massive, meuble, microporosité très importante, densité apparente très faible, très friable, quelques racines moyennes et fines, transition nette et régulière.

40 cm et plus

— Calcaire friable

4. SOL FERRALLITIQUE ALLITIQUE SUR ANDÉSITE : LK 12

— *Localisation* : Fidji, Lakéba, plateau, zone centrale de l'île, altitude 220 m.

— *Climat* : tropical océanique à saison sèche marquée ; pluviométrie 2 000 mm/an.

— *Site* : plateau niveau Ia.

— *Matériau originel* : Andésite.

— *Végétation* : Formation à Talasiga, strate herbacée, *Dicranopteris linearis*, *Pteridium esculentum*, graminées, composées, strate arbustive et arborée, *Dodonea viscosa*, *Metrosideros collina*, *Miscanthus floridulus*, *Pandanus odoratissimus*, *Casuarina equisetifolia*.

A₁ - 0-8 cm

— Frais, brun rouge très foncé, 5 YR 3/2, à matière organique non directement décelable, sablo-argileux, nombreux petits gravillons ferro-manganeux, quelques éléments de meulière dispersés à la surface, structure fragmentaire peu nette, polyédrique subangulaire fine, volume des vides important, friable, nombreuses racines moyennes et fines.

Transition distincte et régulière.

A₂ - 8-52 cm

— Frais, rouge sombre, 5 YR 3/4, limono-argileux, quelques concrétions ferro-manganeuses, structure fragmentaire peu nette, polyédrique subangulaire moyenne à fine, volume des vides important, nombreux pores tubulaires, très friable, nombreuses racines moyennes et fines.

Transition graduelle et régulière.

B₁ - 52-85 cm

— Frais, rouge sombre, 5 YR 3/4, argileux, quelques gravillons ferro-manganeux, structure fragmentaire peu nette, polyédrique moyenne, volume des vides faible, agrégats poreux, ferme, quelques racines moyennes et fines.

Transition graduelle et régulière.

B₂ - 85-120 cm

— Frais, rouge, 2,5 YR 4/6, argileux, quelques gravillons ferro-manganeux, structure fragmentaire très faible, peu poreux, faces luisantes, légère cimentation, quelques racines fines.

Transition graduelle et régulière.

B₃ - 120-150 cm

— Frais, rouge, 2,5 YR 4/6, argileux, quelques rares concrétions ferro-manganeuses, structure fragmentaire nette, polyédrique moyenne, volume des vides faible, peu poreux, faces luisantes, friable, pas de racine.

Transition graduelle et régulière.

B_{3C} - 150-190 cm

— Frais, rouge, 2,5 YR 4/6, argileux, structure fragmentaire peu nette, polyédrique moyenne, volume des vides faible, quelques pores tubulaires, friable, pas de racine.

Intervention finale

Georges AUBERT

Pour clore cette journée qui a apporté beaucoup — et sur des plans très divers à chacun de nous je l'espère, et à moi en particulier — en témoignages d'affection, d'amitié, de sympathie, mais aussi, en rappels de travaux sur le terrain ou au laboratoire, et de coopération, en éclairage souvent très vif de résultats obtenus et d'applications réalisées, il m'a été demandé de souligner quelques points apparus aujourd'hui comme essentiels ou au moins très importants.

Qu'avant cela, un souvenir ému et attristé nous unisse autour des noms..., autour de la personnalité de ceux de notre équipe qui nous ont quittés, qui sont morts, sur le terrain, le plus souvent sur la route menant au terrain : BANCAL, NÉLIS, LAPLANTE, SCHNEIDER-MAUNOURY, MASSONI... que leur route les ait conduits au Lieu de la Paix et de la Connaissance.

I

Pour nous, le plus souvent naturalistes, parfois géochimistes ou d'autres fois géographes, *l'étude du sol ne peut être que globale*. Elle l'est, en intégrant ce sol avec son profil et ses divers caractères, dans son paysage et dans son environnement d'autres sols constituant les divers éléments de ses séquences. Elle est globale, en incluant tous les aspects du sol, minéralogiques, physiques ou chimiques, mais aussi biologiques. De plus en plus, nous savons que non seulement les microorganismes qui s'y développent sont à la base de beaucoup de ses transformations, mais aussi toute la mésofaune qui s'y trouve et dont l'influence est si considérable aussi bien sur le plan de sa matière organique et sa fertilité chimique, que sur celui de la différenciation de son profil (BACHELIER, ROOSE, LÉVÊQUE).

L'étude globale du sol ne porte pas sur lui seul, mais sur lui avec sa végétation dont le système racinaire influe si profondément sur la circulation des eaux; ainsi qu'avec l'atmosphère qu'il contient et celle qui est à sa surface, éléments dont l'importance n'échappe plus. On peut considérer (avec CHATELIN, BEAUDOU, etc.) que la surface du sol n'est pas une limite réelle mais un terme de passage entre les éléments constitutifs du milieu.

Seule une étude multidisciplinaire — par un ou plusieurs chercheurs —, peut permettre de réaliser une approche aussi globale.

Le sol reconnu et étudié doit pouvoir être dénommé. N'ayant pas de « parents », il ne peut l'être qu'en fonction de sa constitution, de son organisation et de son histoire passée, actuelle et même future, donc de son évolution. Un cadre morphogénétique permet d'exprimer l'individu sol de façon globale; une « photographie » ne donnant que sa morphologie ou la seule énumération de ses constituants ne le peut pas, car il « vit ».

De grands efforts et des recherches ininterrompues sont encore nécessaires pour y parvenir, principalement sur trois plans :

— *celui de l'organisation fondamentale du sol*, que nous savons si mal regarder et encore moins interpréter;

- celui de sa biologie, que nous connaissons si imparfaitement, déjà dans le développement de ses micro-organismes, et surtout dans l'influence de sa mésofaune;
- celui de sa place dans le paysage et de ses liaisons avec les sols voisins.

II

Au cœur même de notre recherche pour comprendre les sols, nous devons chercher à *en interpréter observations et mesures en termes d'évolution* du sol dans le cadre de son *développement chronoséquentiel*, en fonction de ses différents éléments constitutants, organisation, environnement. Cela nécessite des observations précises et approfondies et des quantifications sur le terrain (cases lysimétriques et Erlo), puis, au laboratoire, des analyses et études microscopiques des échantillons prélevés; enfin des essais de reconstitution des processus, en parcelle sur le terrain ou au laboratoire, afin de retrouver les phénomènes observés.

Parmi les difficultés de réalisation d'un tel programme une paraît très importante : le temps nécessaire à ces divers processus pour que les phénomènes correspondants apparaissent. On peut chercher à les rendre plus rapides; il ne faut pas, en même temps, en modifier le sens. Certains cependant, le plus souvent de dégradation, sont relativement plus rapides, en particulier sous l'action de l'homme; il est, lui aussi, facteur d'évolution et parmi les plus efficaces, surtout en pays tropical. Deux processus, particulièrement importants, à la fois sur le plan de la pédogenèse et sur celui de l'utilisation des sols, dépendent très largement de lui : salinisation-alcalisation et érosion. Trop peu sont ceux qui, dans notre équipe, les étudient. Leur connaissance ainsi que, plus généralement, celle de la dynamique actuelle des sols constituent une recherche prioritaire pour nous, sans aucun doute.

III

Connaître les sols, comprendre leur évolution, notre influence possible, et le moyen d'éviter leur dégradation, déterminer leurs aptitudes et leurs qualités en vue d'un type d'utilisation ou d'un autre est fondamental comme premier but de notre recherche. Tout cela ne peut suffire pour savoir quels résultats obtenir de leur « mise en valeur ». *Les cartographier*, en tant que chacun des individus reconnus et dans leur ensemble est indispensable. C'est une tâche fondamentale de l'O.R.S.T.O.M. qui nous est souvent demandée et de plus en plus dans des conditions très difficiles. C'est un thème de recherche très valable. C'est aussi une étude de base indispensable comme fondement de toute recherche sur la classification des sols; c'est la méthode la plus efficace à la fois pour faire ressortir les liens des sols entre eux et avec leurs facteurs de formation et pour permettre de poser clairement les problèmes non encore résolus de pédogenèse en particulier, si on peut la réaliser suffisamment dans le détail et à assez grande échelle, au moins en certains secteurs.

L'utilisation des méthodes les plus modernes comme l'interprétation des données de télédétection doit être toujours plus poussée. Non seulement elles facilitent la tâche du pédologue cartographe, mais aussi elles font souvent ressortir certains caractères ou certains liens qui auraient pu ne pas être observés sans elles.

La cartographie des sols, de type pédologique et comportant une légende appuyée sur une classification, est un élément indispensable comme base de la connaissance du milieu; de type interprétatif ou thématique, elle l'est en vue de son utilisation, de sa mise en valeur ou de son aménagement, sur les plans de l'agriculture en général, des travaux publics et constructions, de la lutte contre les pollutions, etc.

IV

Cette cartographie pédologique se fait sur un plan régional aux échelles de 1/200.000 à 1/50.000 et sur un plan local à celles de 1/25.000 à 1/10.000. Ces dernières, ainsi que celles à 1/50.000 et, le cas échéant, à 1/100.000 doivent ensuite être *interprétées*, en vue de préparer une mise en valeur agricole, pastorale ou forestière ou un aménagement général, en *cartes d'aptitudes ou de contraintes culturelles*, actuelles ou après améliorations habituelles (VIEILLEFON) ou encore en *cartes d'aptitudes à la mise en valeur* (POUGET)... ce qui nécessite une intégration des données géomorphologiques et floristiques aux données pédologiques proprement dites qui restent la base de ces cartographies d'application. Sur ce point, beaucoup encore reste à faire, malgré le nombre et la diversité des méthodes essayées.

Enfin *les cartes thématiques de ressources en sols*, dressées même aux petites échelles (1/300.000-1/500.000), peuvent être indispensables pour assurer une planification générale. Elles doivent toujours s'appuyer sur une carte pédologique préalable.

Ces diverses cartes d'application nécessitent, dans la plupart des cas, une connaissance approfondie des *exigences édaphiques des principales cultures* des différentes zones écologiques. Celle que nous en avons est, d'une façon générale, très insuffisante. Elle n'a été obtenue, en coopération, le plus souvent, avec des agronomes, que par des observations et trop peu de mesures ou de déterminations précises. Un effort doit aussi être fait sur ce plan pour mieux définir, avec agronomes et phytophysiologistes, les relations sols-cultures, et les modifications qu'y provoquent, sur les divers plans, physique, hydrodynamique, chimique et biologique, les interventions de l'homme. Les réactions du système racinaire des cultures doivent y être étudiées avec autant de précision que possible.

La mise en valeur d'un secteur, surtout suivant de nouveaux systèmes de culture, par exemple avec introduction de l'irrigation ou à la suite du défrichement de la forêt, nécessite un *suivi de l'évolution des sols* dans ces nouvelles conditions. Les résultats n'en sont valables que s'il est poursuivi assez longtemps, si possible pendant au moins 10 ans, temps nécessaire, dans beaucoup de cas, pour qu'un nouvel équilibre s'établisse. Très souvent une durée de 5 à 7 ans est insuffisante.

En général, là où travaillent maintenant les équipes pédologiques ou agronomiques de l'O.R.S.T.O.M., intéressées, les unes comme les autres, par cette étude, ce n'est plus à elles de la réaliser. Seuls les chercheurs du pays peuvent s'en charger avec un espoir de permanence suffisante. Nous devons cependant y penser, et ne pas nous en désintéresser. Il nous reste souvent à lancer cette recherche et à l'animer... au moins pendant le temps de notre séjour, peut-être encore après.

Depuis août 1944 les pédologues de l'O.R.S.C., puis de l'O.R.S.T.O.M., ont fait largement avancer la connaissance des sols et de leurs possibilités d'utilisation. Il reste encore beaucoup à chercher et, certainement, à trouver.

TABLE ANNUELLE 1980-1981

	Pages
AUBERT (G.). — Intervention finale à la Journée de Pédologie du 11 septembre 1980.	317
AUBRY (A.-M.), BOULVERT (Y.) et SÉCHET (P.). — Un service offert aux pédologues : représentation automatique élaborée d'un caractère spatial.	261
BACHELIER (G.). — Étude spectrographique de la fluorescence des acides humiques et des acides fulviques des divers sols.	129
BERNHARD-REVERSAT (F.). — Note sur l'influence du régime thermique et hydrique sur l'ammonification et la nitrification dans un sol de savane sahélienne.	147
BOCQUIER (G.). — Cf. MULLER (D.).	87
BONZON (B.). — Cf. TALINEAU (J.-C.).	29
BOULAIN (J.). — La contribution de Georges AUBERT et de la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. à l'orientation de la Pédologie française.	163
BOULVERT (Y.). — Cf. AUBRY (A.-M.).	261
BOYER (J.). — Toxicité apparente de certains engrais et intoxication manganique induite.	297
CHEVERRY (C.). — Derniers développements de la Recherche sur les sols salés.	193
DABIN (B.). — Les matières organiques dans les sols normalement drainés.	197
DELMAS (A.-B.). — Cf. PEDRO (G.).	217
FAUCK (R.). — Sols sub-arides au sud du Sahara.	189
FAUCK (R.). — Cf. ROOSE (E.).	153
FILLONNEAU (C.). — Cf. TALINEAU (J.-C.).	29
FLAGEOLLET (J.-C.). — Aspects morphoscopiques et exoscopiques des quartz dans quelques sols ferrallitiques de la région de Cechi (Côte d'Ivoire).	111
HAINNAUX (G.). — Cf. TALINEAU (J.-C.).	29
HÉNIN (S.). — Pédologie et agronomie : du concept de « vocation » au concept d'« Aptitude » des sols.	173
JANOT (C.). — Cf. TOBIAS (C.).	49
KOVDA (V. A.). — Georges AUBERT, savant et ami.	187
LATHAM (M.). — Les oxydisols dans quelques milieux insulaires du Pacifique Sud : caractérisation, conditions de formation, fertilité, classification.	305
LENEUF (N.). — Exposé introductif à la journée pédologique organisée en hommage à Georges AUBERT. .	161
MÉGIE (C.). — Cf. TOBIAS (C.).	71
MILLOT (G.). — Apport de la pédologie à la géologie de surface.	179
MULLER (D.), BOCQUIER (G.), NAHON (D.) et PAQUET (H.). — Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo.	87
NAHON (D.). — Cf. MULLER (D.).	87
PAQUET (H.). — Cf. MULLER (D.).	87
PEDRO (G.) et DELMAS (A. B.). — Regards actuels sur les phénomènes d'altération hydrolytique. Leur nature, leur diversité et leur place au cours de l'évolution géochimique superficielle.	217
PONTANIER (R.). — Pédologie et écologie en zone aride au nord du Sahara. Aménagement agropastoral d'une région du Sud tunisien sur des bases écologiques.	247

	Pages
POUGET (M.). — Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes : quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle.....	235
RAYCHAUDHURI (S. P.). — The occurrence, distribution, classification and management of laterite and lateritic soils.....	249
RIEU (M.). — Sodium Adsorption Ratio et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux.....	123
RIEU (M.). — La simulation mathématique. Une méthode d'étude des sols salés.....	253
ROOSE (E.). — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique très désaturé sur sédiments sablo-argileux sous culture et sous forêt dense humide sub-équatoriale du sud de la Côte-d'Ivoire. Adiopodoumé 1964-1976. 2 ^e partie : Les transferts de matières.....	3
ROOSE (E.). — Quelques conclusions de recherches françaises sur la dynamique actuelle des sols en Afrique occidentale	285
ROOSE (E.) et FAUCK (R.). — Des contraintes d'origine climatique limitent l'exploitation des sols ferrallitiques dans les régions tropicales humides de Côte d'Ivoire.....	153
SÉCHET (P.). — Cf. AUBRY (A. M.).....	261
SÉGALEN (P.). — Aspects minéralogiques et pédogénétiques de deux sols dérivés de péridotites dans l'ouest de Cuba	273
TALINEAU (J.-C.), BONZON (B.), FILLONNEAU (C.) et HAINNAUX (G.). — Contribution à l'étude d'un agro-système prairial dans le milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire. 2. Analyse des données relatives à l'état de matière organique.....	29
TAVERNIER (G.). — Georges AUBERT et son rôle international.....	183
TOBIAS (C.) et JANOT (C.). — L'évolution de la montmorillonite ferrifère, des oxydes et hydroxydes de fer dans une séquence fersiallitique au Sénégal. Étude par spectrométrie Mössbauer de la fraction fine d'échantillons de sols.....	49
TOBIAS (C.) et MÉGIE (C.). — Les lithométéores au Tchad. Premiers résultats concernant la nature, la composition et l'importance des aérosols transportés par voie atmosphérique dans la région de N'Djamena (Tchad).....	71

50

77


```

Sxz=C.
Srz=0.
Syy=0.
Sxx=0.
XP=0
DO 17 K=1,NP0IN
XP=XP+F(K)
SX=SX+F(K)*U(K)
SY=SY+F(K)*V(K)
17 SZ=SZ+F(K)*W(K)
XM=SX/XP
YM=SY/XP
ZM=SZ/XP
DO 18 K=1,NP0IN
SXX=SXX+(F(K)*(U(K)-XM))*2
SYY=SYY+(F(K)*(V(K)-YM))*2
SXY=SXY+F(K)*(U(K)-XM)*(V(K)-YM)
SXZ=SXZ+F(K)*(U(K)-XM)*(W(K)-ZM)
18 SYZ=SYZ+F(K)*(V(K)-YM)*(W(K)-ZM)
SKK=SXX*SYY-SXY**2
IF(SKK) 88,87,88
88 B1=(SXZ*SYY-SYZ*SXY)/SKK
B2=(SYZ*SXX-SXZ*SY)/SKK
B3=ZM-B1*XM-B2*YM
X0=ICOL*DX
Y0=JLIG*DY
Z=B0+B1*X0+B2*Y0
J$(NW)=JCOL
J$(NW)=JLIG
Z$(NW)=Z
GO TO 75
87 I$(NW)=ICOL
J$(NW)=JLIG
Z$(NW)=ZM
75 CONTINUE
76 CONTINUE
DO 134 I=1,NW
K=I$(I)
L=J$(I)
134 A(L,K)=Z$(I)
90 CONTINUE
4 CONTINUE
DO 138 L=1,NL
DO 84 K=1,NC
DO 85 J=1,3
85 AA(K,J)=BL
IF(A(L,K).GE.(ZMAX+DZ))A(L,K)=A(L,K)-2.*DZ
DO 86 J=1,NCLAS
IF(A(L,K).GT.L1M(J))GO TO 86
DO 89 I=1,3
AA(K,I)=SYM(J,6*(NCLAS-1)+J)
GO TO 84
86 CONTINUE
DO 83 I=1,3
83 AA(K,I)=SYM(I,6*(NCLAS-1)+NCLAS)
84 CONTINUE
LL = 100. * (NL-L)/(NL-1) + .5
LL=1
IF (LL.EQ.LL/10*10) GOTO 139
WRITE(6,401)(AA(K,1),K=1,NC)
WRITE(6,403)(AA(K,2),K=1,NC)

```

```

WRITE(6,403)(AA(K,3),K=1,NC)
401 FORMAT(3X,'I',1X,128A1)
GOTO 138
139 WRITE(6,402)LL,(AA(K,1),K=1,NC)
WRITE(6,403)(AA(K,2),K=1,NC)
WRITE(6,403)(AA(K,3),K=1,NC)
402 FORMAT(14,'=',128A1)
403 FORMAT('+',128A1)
138 CONTINUE
WRITE(6,700)
700 FORMAT(////,20H L E G E N D E,1X19H SYMBOLE LIM. SUP.,/)
DO 82 K=1,NCLAS
L=6*(NCLAS-1)+K
WRITE(6,701)SYM(1,L),LIM(K)
701 FORMAT(1X5XA1,F10.2)
WRITE(6,702)SYM(2,L)
WRITE(6,702)SYM(3,L)
702 FORMAT('+',A1)
82 CONTINUE
WRITE(6,100)NU
WRITE(6,703)DX,DY
GO TO 72
300 WRITE(6,301)
301 FORMAT(1H1,'PLUS DE 1500 DONNEES')
72 STOP
END

```

Liste FORTRAN du programme

Annexe de l'article AUBRY *et al* :

«Un service offert aux pédologues : représentation automatique élaborée d'un caractère spatial».

Cah. O.R.S.T.O.M., série Pédologie, vol. XVIII, n° 3/4, 1980-1981.

CONTENTS

1 - LENEUF (N.) - An Introduction to the Day organized in honour of Georges AUBERT	161
2 - BOULAIN (J.) - The role played by Georges AUBERT and the ORSTOM soil division in the evolution of French soil science	163
3 - HENIN (S.) - Soil science and agronomy: from the concept of « land capability » to the concept of « land management »	173
4 - MILLOT (G.) - The contribution of soil science to surface geology	179
5 - TAVERNIER (R.) - Georges AUBERT and its international role	183
6 - KOVDA (V. A.) - Georges AUBERT as a scientist and friend	187
7 - FAUCK (R.) - Subarid soils south of the Sahara	189
8 - CHEVERRY (C.) - The latest developments in the research about saline soils	193
9 - DABIN (B.) - Organic matter in soils	197
10 - PEDRO (G.) and DELMAS (A. B.) - Current aspects of the phenomena of hydrolytic weathering. Their nature, diversity and location during the surface geochemical evolution. 217	
11 - POUGET (M.) - Calcareous soils in the Algerian steppes: a few morphological aspects and outline of a current evolution	235
12 - PONTANIER (R.) - Soil science and ecology in the arid zone north of the Sahara. Agropastoral development of a region in South-Tunisia from an ecological point of view	247
13 - RAYCHAUDHURI (S. P.) - Apparition, répartition, classification et mode d'exploitation des latérites et des sols latéritiques	249
14 - RIEU (M.) - Mathematical simulation. A method for studying saline soils	253
15 - AUBRY (A. M.), BOULVERT (Y.) and SECHET (P.) - A technique at the disposal of pedologists: a sophisticated automatic representation of a spatial character	261
16 - SEGALEN (P.) - Mineralogical and pedogenic aspects of two soils derived from pedidotite in the west of Cuba	273
17 - ROOSE (E.) - Some conclusions drawn from French researches about the current soil dynamics in Western Africa	285
18 - BOYER (J.) - Apparent toxicity of some fertilizers and induced manganite intoxication	297
19 - LATHAM (M.) - Oxidisols in some islands of the South Pacific: characterization, soil genesis, fertility and classification	305
20 - Final speech by Georges AUBERT	317
Annual table 1980-1981	321

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction Générale : 24, rue Bayard, 75008 PARIS
Service des Éditions : 70-74, route d'Aulnay,
93140 BONDY

Abonnement annuel : *France, Europe, TOM-DOM* 144 F
(Publ. trimestrielle) *Étranger* 187 F

Service Publications ORSTOM
C. C. P. 22.272.21 Y PARIS
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY

Directeur : C.-R. HIERNAUX

BONTEMPS LIMOGES (FRANCE)

O. R. S. T. O. M. Éditeur
D. L. Éditeur : Janvier 1982
D. L. Imprimeur : n° 9044-B1
C.P.P.A.P. N° 1075 ADEP

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

DIRECTION GÉNÉRALE : 24, rue Bayard - 75008 PARIS

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : C.R. HIERNAUX

SERVICE DES ÉDITIONS : 70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

DÉPOT LÉGAL ÉDITEUR : 1er trim. 1982